

論文 初期高温履歴を与えたコンクリートの収縮特性に及ぼす結合材種類と養生条件の影響

柏尾 和麻^{*1}・佐々木 謙二^{*2}・片山 強^{*3}・原田 哲夫^{*4}

要旨：本論文では、PCa 製品の品質化、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの副産資源の有効利用が広がりつつある現状を踏まえ、PCa 製品を想定した初期高温履歴を与えたコンクリートの収縮特性に及ぼす結合材種類と養生条件の組合せの影響について実験的に検討した。その結果、温度収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ、自己収縮ひずみ、全収縮ひずみに及ぼす結合材種類と養生条件の影響を明らかにし、収縮ひずみの特に大きな結合材種類と養生条件の組合せがあることを示した。また、全収縮ひずみと静弾性係数増加率には相関関係が見られ、全収縮ひずみが大きくなると静弾性係数増加率は小さくなることを明らかにした。

キーワード：蒸気養生、保温養生、収縮、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、静弾性係数

1. はじめに

コンクリートの各種性能は、材料や配合のみならず、施工の良し悪し、養生条件、暴露条件などの影響を大きく受ける。その点を考慮すると、現場打ちのコンクリートよりも工場で製造されるプレキャストコンクリート (PCa) 製品の方が品質が安定しており、施工の面においても工期短縮や省力化が可能である。それにもかかわらず、PCa 製品の利用は拡大されていない。現在の社会状況 (構造物の長期利用のための高耐久・高品質化、環境負荷抑制、副産資源の活用、熟練労働者の不足) を考慮すると、今後 PCa 製品が社会状況を改善する方法として利用される機会は多いと考えられる¹⁾。PCa 製品のコンクリート特性に関する研究はこれまで強度特性が主として行われ、収縮特性についての研究は少なく²⁾、蒸気養生中と脱枠後の乾燥環境下の長さ変化特性を総合的に検討した例はほとんどない。

そこで本研究では、PCa 製品の品質化、環境負荷抑制、副産資源の有効活用の観点から、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用が広がりつつある現状を踏まえ、1日1サイクルまたは2サイクルの製造を想定した初期温度履歴を与えたコンクリート、すなわち PCa 製品の製造の際に多く採用されている蒸気養生に加え、外部からの熱源を用いることなくコンクリートの水和反応による自己発熱により高温履歴を与える保温養生にも着目し、収縮特性 (温度収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ、全収縮ひずみ、自己収縮ひずみ) に及ぼす結合材種類と養生条件の影響を実験的に検討した。また、力学的特性 (静弾性係数) と収縮特性の関係についても検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

表-1 にコンクリートに使用した材料を示す。実験に用いた結合材は、普通ポルトランドセメント[N]、早強ポルトランドセメント[H]、N と高炉スラグ微粉末 6000 (JIS A 6206) の混合系(65% : 35%)[NB]、N とフライアッシュ (JIS A 6201 II種) の混合系(80% : 20%)[NF]の4種類とした。細骨材は海砂、粗骨材は碎石を用いた。混和剤としては、凍害を受ける恐れのない地域で使用される PCa 製品を想定して高性能減水剤を用い、Non-AE コンクリートとした。

(2) 配合

表-2 にコンクリートの配合を示す。PCa 製品を想定した Non-AE コンクリートとし、水結合材比 40%、細骨材率 37%、目標空気量 2.0%とした。単位水量は 165kg/m³一定とし、目標スランプ 8cm となるよう適宜混和剤の添加量を調整した。

2.2 養生条件

表-3 に養生条件を示す。各養生条件は、表-3 に示すように【 】で示す。

蒸気養生条件は、前置時間、最高温度、降温速度を変化させた。前置時間は3時間または30分、最高温度は 65℃または 40℃、降温速度は 4.5℃/h (徐冷) または急冷とした。なお本研究では、恒温恒湿槽 (湿度 90~95%) において所定の温度履歴を与えることにより蒸気養生を模擬した。また供試体からの水分逸散を防ぐために、供試体をビニールで密封した状態で温度履歴を与えた。急冷は、最高温度保持時間終了後に供試

*1 長崎大学 大学院工学研究科総合工学専攻 (学生会員)

*2 長崎大学 大学院工学研究科システム科学部門助教 博 (工) (正会員)

*3 (株) ヤマウ 技術本部開発・設計部 (正会員)

*4 長崎大学 大学院工学研究科システム科学部門教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

項目	種類	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm ³ , 比表面積 3240cm ² /g
	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4520cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末	密度 2.91g/cm ³ , 比表面積 5920cm ² /g
	フライアッシュ	密度 2.26g/cm ³ , 比表面積 3960cm ² /g
細骨材	海砂	密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 1.87%, 粗粒率 2.47
粗骨材	碎石 (安山岩)	密度 2.76g/cm ³ , 吸水率 0.69%, 粗粒率 6.66
混和剤	高性能減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物

表-2 配合

配合記号	結合材種類	水結合材比 W/B	細骨材率 s/a	単位量 (kg/m ³)					
				水 W	セメント C	混和材 SCM	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AD
N40	N	40%	37%	165	413	—	648	1189	0.83
H40	H				413	—	647	1188	1.03
NB4035	NB				268	145	644	1182	0.83
NF4020	NF				330	83	638	1172	0.62

表-3 養生条件

養生条件記号	養生方法	前置時間 (h)	昇温速度 (°C/h)	最高温度 (°C)	最高温度保持時間(h)	降温速度 (°C/h)	後養生方法 (材齢 1 日以降)
【A-D】	蒸気養生	3	20	65	4	4.5	気中養生 (20°C, R.H.60%)
【D-D】		0.5				急冷	
【E-D】		3		40		4.5	
【I-D】	保温養生(24h)						気中養生 (20°C, R.H.60%)

体を 20°C の恒温室に移動させることにより行った。

蒸気養生に代わる高温履歴の付与方法として保温養生にも着目し検討を行った。保温養生は、JASS 5 T-606 : 2005「簡易断熱養生供試体による構造体コンクリート強度の推定方法」に準拠して養生を行った。この養生方法は、断熱容器中に供試体を設置し、外部からの熱源を用いることなく、コンクリートの自己発熱により高温履歴を与える方法である。本研究では、厚さ 300mm のポリスチレンフォームにより保温養生槽を作製し、供試体を設置した後に、その隙間をなくすために発泡ビーズを入れて水和熱が保持されるようにした。なお、打設から脱型時までの供試体最高温度は N40 : 53.8°C, H40 : 68.1°C, NB4035 : 50.9°C, NF4020 : 48.3°C となった³⁾。

すべての養生条件において練混ぜから 24±0.5 時間後に脱型を行い、後養生方法として気中養生(温度 20±1°C, 湿度 60±5%)を継続して行った。なお、本研究では試験体名を「配合記号【養生条件記号】」で表す。

2.3 実験項目

(1) 初期高温履歴時におけるひずみ測定

100×100×400mm の型枠にコンクリートの自由な変形が拘束されるのを防ぐために、底面にテフロンシート(厚さ 1mm)を、両端部にポリスチレンボード(厚さ 3mm)を入れ、さらにその内側にポリエステルフィルム(厚さ 0.1mm)を入れて、コンクリートと型枠が接触しないようにした。モールドゲージ(直径 4mm, 標点距離 60mm)が供試体の中心部に配置されるように設置し、打設直後から降温後 20°C 一定までのひずみを測定した。3. において示す温度収縮ひずみ、全収縮ひずみは、ひずみの実測値にモールドゲージの長さ変化率(線膨張係数×初期からの温度変化量)を足し合わせて温度補正をして算出した。

(2) 乾燥環境下における収縮ひずみ測定

初期高温履歴時におけるひずみの測定に引き続いて、後養生時の乾燥環境下における収縮ひずみをモールドゲージにより測定した。乾燥環境は温度 20±1°C, 湿度 60±5%とした。乾燥開始材齢は、気中養生を始め

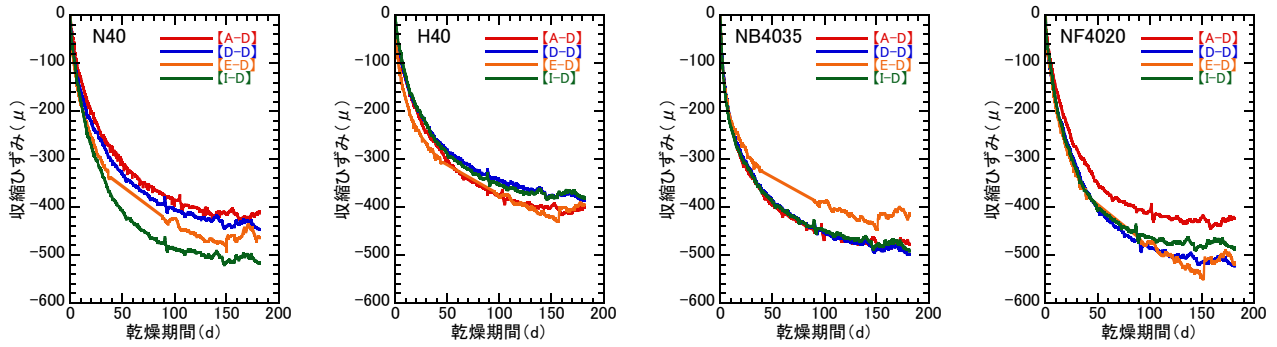


図-1 乾燥環境下における収縮ひずみ

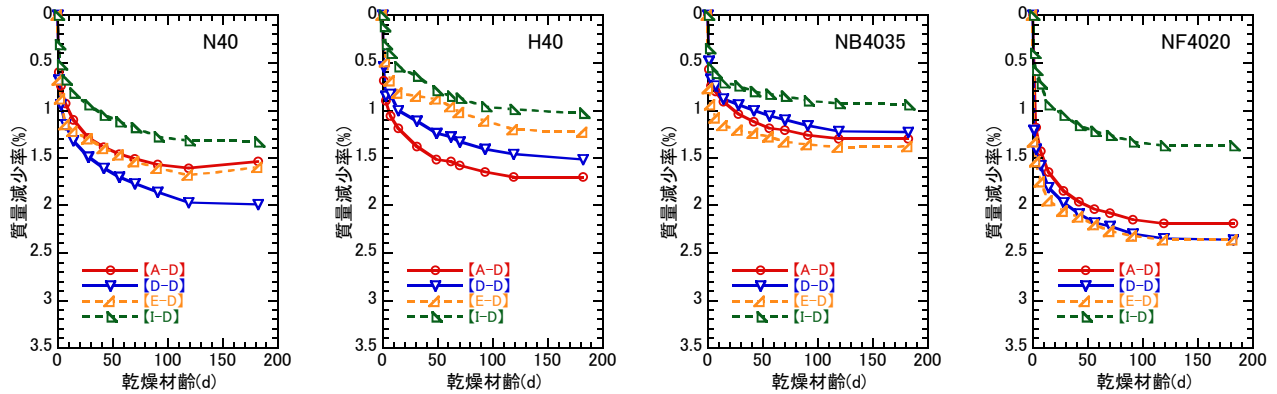


図-2 乾燥環境下における質量変化率

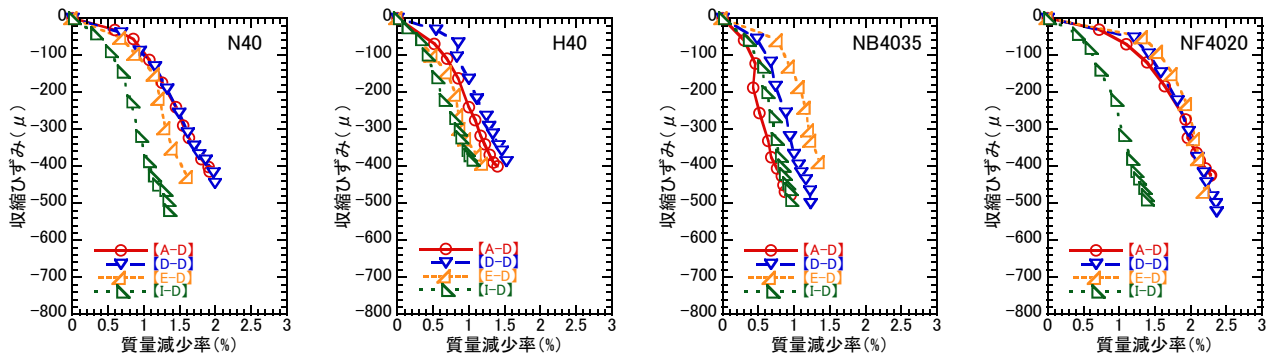


図-3 乾燥環境下における収縮ひずみと質量変化率の関係

た材齢 1 日とした。乾燥環境下における収縮ひずみの測定と合わせて、質量減少率も測定した。

(3)自己収縮ひずみ測定

初期高温履歴時におけるひずみの測定に引き続いて、試験体全体をアルミテープにより被覆し、初期高温履歴以降（材齢 1 日以降）の自己収縮ひずみをモールドゲージにより測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 乾燥環境下における収縮ひずみ

図-1 に乾燥開始時点をもとにした収縮ひずみの測定結果を結合材別に示す。なお、収縮ひずみの経時変化に上下の変動が見られるのは、試験環境の変動ためと考えられる。蒸気養生パターンが大きく異なる

【A-D】と【D-D】の場合を比較すると、N40 や NF4020 では【D-D】の方が収縮ひずみが大きくなったが、H40 では【D-D】の方が収縮ひずみが小さくなった。蒸気養生パターンで最高温度のみ異なる【A-D】と【E-D】とを比較すると、N40 や NF4020 では最高温度の低い【E-D】の方が収縮ひずみが大きくなったが、NB4035 では【E-D】の方が収縮ひずみが小さくなった。蒸気養生【A-D】、【D-D】、【E-D】と保温養生【I-D】を比較すると、N40 では【I-D】の場合の収縮ひずみが【A-D】、【D-D】の場合に対して材齢 182 日において 20%程度大きくなった。H40, NB4035 では収縮ひずみの経時変化挙動に蒸気養生と保温養生とに大きな違いは見られなかった。NF4020 では【I-D】の収縮ひずみは【D-D】と同様の傾向を示した。

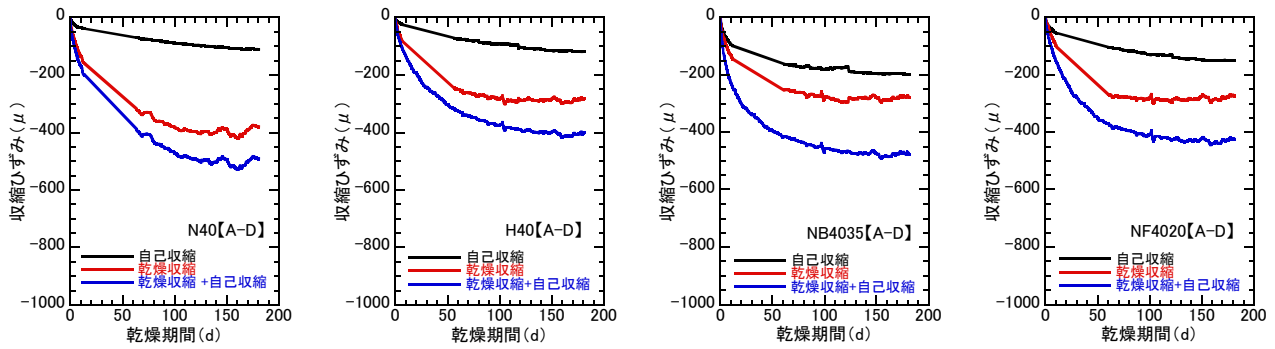


図-4 自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみ

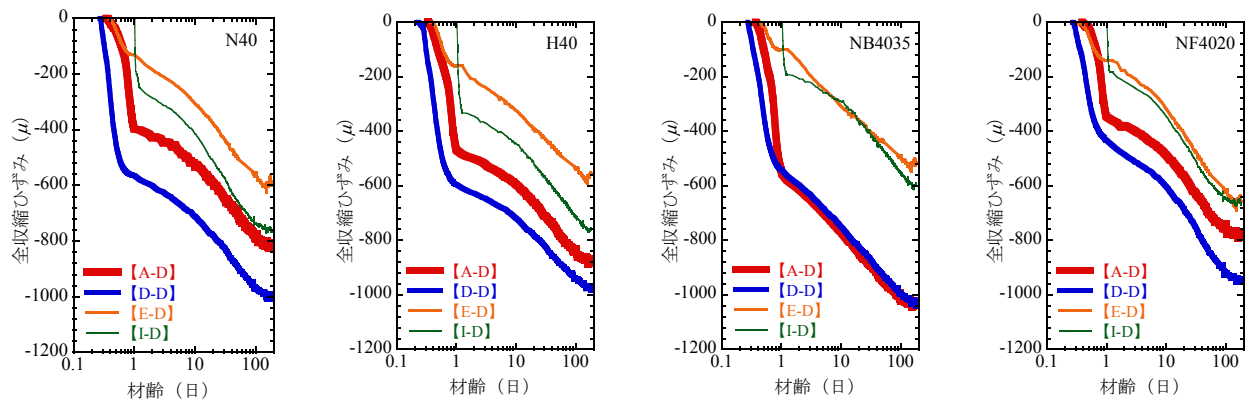


図-5 全収縮ひずみ

図-2 に乾燥開始時点をもとにした質量変化率を結合材別に示す。いずれの結合材においても【I-D】は質量変化率が小さくなった。特に NF4020 においては顕著に差が見られた。【A-D】と【D-D】を比較すると、N40 と NF4020 においては【A-D】の方が質量変化率が小さかったが、H40 と NB4035 においては【A-D】の方が大きくなった。【E-D】においては、H40 において【A-D】と比較すると質量変化率が小さくなったが、他の結合材ではさほど違いは見られなかった。

図-3 に乾燥期間 182 日までの乾燥環境下における収縮ひずみと質量変化率の関係を結合材別に示す。N40 では【I-D】において、質量減少率が【A-D】、【D-D】よりも小さいにもかかわらず、収縮ひずみが大きい値となった。H40 では他の結合材に比べ、いずれの養生条件においても収縮ひずみが小さくなった。NB4035 の場合には他の結合材に比べ、いずれの養生条件においても質量減少率が小さくなったが、収縮ひずみは他の結合材と同程度もしくはそれ以上となった。NF4020 の場合には【D-D】が【A-D】よりも質量減少率かなり小さいにもかかわらず収縮ひずみが大きくなった。これらの現象の要因は、水分の移動のしやすさや高温履歴中での内部湿度の低下などが考えられる。

3.2 自己収縮ひずみ

図-4 に蒸気養生条件【A-D】における自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみを結合材別に示す。乾燥収縮ひずみは乾燥環境下における収縮ひずみの測定結果から自己収縮ひずみの測定結果を差し引くことにより算出した。測定期間 182 日における自己収縮ひずみは、N40, H40, NF4020 では 100~150 μ 程度、NB4035 では他の結合材に比べ大きく 200 μ 程度となった。一方、乾燥期間 182 日の乾燥収縮ひずみは、いずれの結合材においてもほぼ同程度である 300 μ 程度となった。

図-5 に高温履歴時の最大膨張を起点とした全収縮ひずみを結合材別に示す。全収縮ひずみは、温度収縮ひずみ、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみの和とみなすことができる。いずれの結合材においても乾燥期間 182 日の全収縮ひずみは【D-D】 > 【A-D】 > 【I-D】 > 【E-D】となっており、最大で 40% 程度の差が生じていることが分かる。高温履歴別に結合材種類が全収縮ひずみに及ぼす影響を見てみると、標準的な蒸気養生条件である【A-D】の場合、N40, H40, NF4020 では乾燥期間 182 日の全収縮ひずみが 800 μ 程度であるにも関わらず、NB4035 では 1000 μ 程度となった。

3.3 全収縮ひずみ

【D-D】の場合には、乾燥期間 182 日の全収縮ひずみは結合材種類によらずほぼ同程度の 1000 μ ほどとなった。最高温度が 40 $^{\circ}$ C の【E-D】の場合には、乾燥期間 182 日の全収縮ひずみは N40 や H40 では 600 μ 程度、

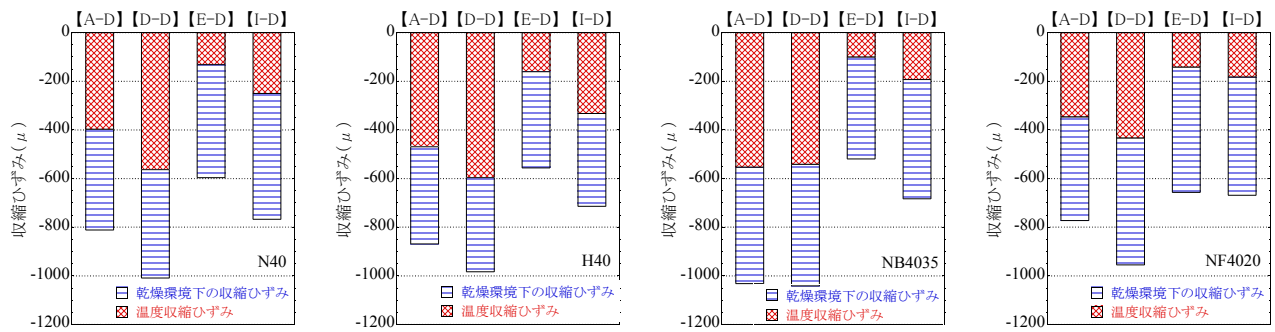


図-6 全収縮ひずみに占める温度収縮ひずみと乾燥環境下における収縮ひずみの割合

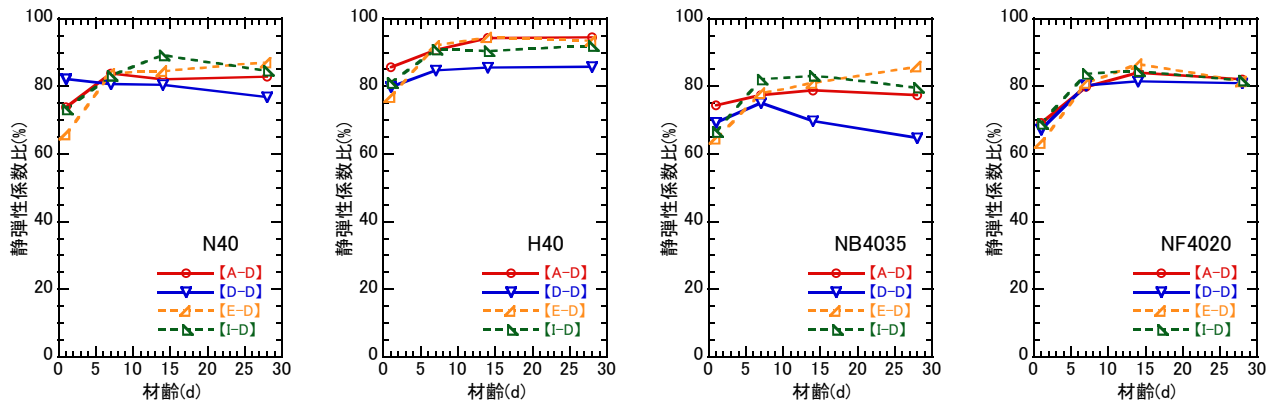


図-7 静弾性係数測定結果

NB4035 では 500μ 程度、NF4020 では 700μ 程度となり、最高温度が 65°C の【A-D】や【D-D】に比べて全収縮ひずみを大きく低減できることがわかる。また、【I-D】の場合には、乾燥期間 182 日の全収縮ひずみは N40 や H40 で 750μ 程度、NB4035 で 600μ 程度、NF4020 で 650μ 程度となった。以上のように NB4035 では最高温度を低くした【E-D】や保温養生【I-D】の全ひずみ低減効果が顕著であり、養生方法の設定に注意を要するとともに、養生方法の工夫次第では収縮の低減を図ることができる可能性が示されたと言える。

図-6 に乾燥期間 182 日までの全収縮ひずみに占める温度収縮ひずみと乾燥環境下における収縮ひず割合を結合材別に示す。いずれの結合材においても乾燥環境下における収縮ひずみは養生条件による差があまりないことがわかる。一方、温度収縮ひずみは養生条件の影響を大きく受け、その大きさが全収縮ひずみの大きさを左右していることがわかる。全収縮ひずみに占める温度収縮ひずみと乾燥環境下における収縮ひずみの割合は最高温度を 65°C とした蒸気養生【A-D】や【D-D】では半分程度ずつであるが、最高温度を 40°C とした蒸気養生【E-D】や保温養生【I-D】の場合には、温度収縮ひずみの占める割合は小さく、全収縮ひずみの $1/3\sim 1/4$ 程度であった。

著者らの保温養生【I-D】を行ったコンクリートの力

学的特性に関する検討結果³⁾や物質移動抵抗性に関する検討結果⁴⁾において、N40 や H40 では材齢 1 日以降で、NB4035 や NF4020 では材齢 7 日以降で蒸気養生【A-D】の場合と同等の圧縮強度を有すること、蒸気養生【A-D】と同等の物質移動抵抗性を有していることが確かめられており、収縮特性特に高温履歴時における温度収縮の観点からも保温養生は蒸気養生に代わる高温履歴の付与方法として適用可能と考えられる。

3.4 全収縮ひずみが力学的特性に及ぼす影響

図-7 に静弾性係数試験の結果を結合材別に示す。なお、セメントや骨材のロットが異なるものがあるため、同バッチから作製した標準養生 28 日試験体の静弾性係数に対する比率として表している。図より初期高温履歴後に気中養生した場合、経時的な静弾性係数の低下が見られる結合材種類と養生条件の組合せがあることが分かった。特に NB4035【D-D】の試験体において著しい静弾性係数の低下が見られた。

図-8 に材齢 28 日における全収縮ひずみと静弾性係数増加率(材齢 1 日の静弾性係数に対する材齢 28 日の静弾性係数の比率)の関係性を結合材別に示す。いずれの結合材においても、全収縮ひずみと静弾性係数増加率には相関関係が見られ、全収縮ひずみが大きくなると静弾性係数増加率は小さくなった。これは、初期高温履歴の降温段階および後養生の気中養生時に収縮ひ

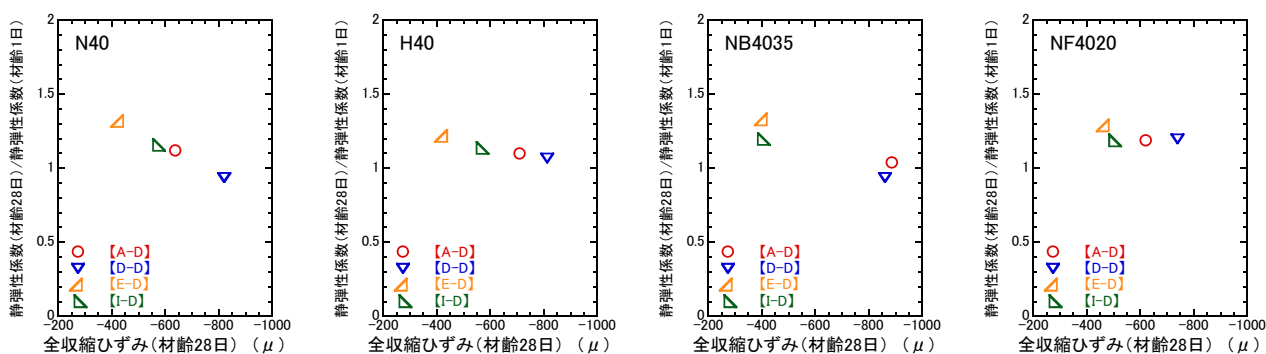


図-8 全収縮ひずみと静弾性係数増加率の関係（結合材別）

ずみの増大とともに内部に微細なひび割れなどの損傷が進展し、それに伴って静弾性係数も低下していったためと考えられる。特に、降温速度を急冷とした【D-D】の場合には、全収縮ひずみも大きく、結合材種類によっては静弾性係数増加率が1を下回るものもあり、内部損傷の程度が大きいものと推察される。

図-9に材齢28日における全収縮ひずみと静弾性係数比増加率の関係を示す。全収縮ひずみと静弾性係数増加率の関係は、結合材によらずほぼ同じとなった。水結合材比、骨材の種類・容積率が同じであれば結合材種類によらず、全収縮ひずみから静弾性係数増加率を、静弾性係数増加率から全収縮ひずみをおおよそ推定できるものと考えられる。

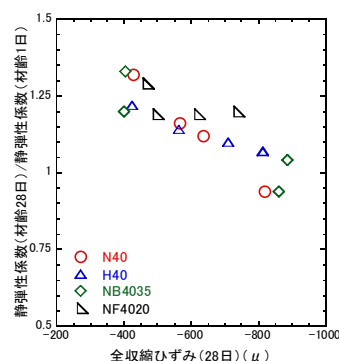


図-9 全収縮ひずみと静弾性係数増加率の関係

相関関係が見られ、全収縮ひずみが大きくなると静弾性係数増加率は小さくなった。

4. 結論

本研究では、PCa製品を想定した温度履歴を与えたコンクリートを対象とし、PCa製品を想定した初期温度履歴を与えたコンクリートの収縮特性（温度収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ、全収縮ひずみ、自己収縮ひずみ）に及ぼす結合材種類と養生条件の影響を実験的に検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 収縮特性に及ぼす結合材種類と養生条件の影響を明らかにし、収縮ひずみの特に大きな結合材種類と養生条件の組合せがあることを示した。
- (2) 測定期間 182 日における自己収縮ひずみは、結合材 N, H, NF では 100~150 μ 程度、NB では他の結合材に比べ大きく 200 μ 程度となった。
- (3) 全収縮ひずみに占める温度収縮ひずみと乾燥環境下における収縮ひずみの割合は最高温度 65 $^{\circ}$ Cとした蒸気養生【A-D】や【D-D】では半分程度ずつであるが、最高温度 40 $^{\circ}$ Cとした蒸気養生【E-D】や保温養生【I-D】では、温度収縮ひずみの占める割合は小さく全収縮ひずみの 1/3~1/4 程度であった。
- (4) いずれの結合材においても材齢 28 日における全収縮ひずみと静弾性係数増加率（材齢 1 日の静弾性係数に対する材齢 28 日の静弾性係数の比率）には

謝辞

本研究は、科学研究費助成事業（科学研究費補助金（基盤研究(B)）、課題番号：24360168、研究代表者：佐伯竜彦新潟大学准教授）の補助を受けて実施したことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会報告書，2009
- 2) 重松宏和，高山章大，伊達重之，笠井哲郎：常圧蒸気養生下におけるコンクリートの長さ変化特性，第35回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，2008
- 3) 岡野耕大，佐々木謙二，片山強，原田哲夫：PCa製品を想定した温度履歴を与えたコンクリートの力学的特性に及ぼす結合材種類と養生条件の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1534-1539，2012
- 4) 佐々木謙二，岡野耕大，片山強，原田哲夫：各種結合材を用いた蒸気養生コンクリートの物質移動性状に関する実験的検討，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，Vol.12，pp.223-230，2012