

論文 PCa 製品を想定した温度履歴を与えたコンクリートの収縮性状に関する基礎的検討

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

要旨：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て、高温履歴時における膨張収縮挙動および後養生時の乾燥環境下における収縮性状に及ぼす結合材種類と養生条件の影響を検討した。その結果、セメントのみの場合には温度収縮ひずみに及ぼす蒸気養生条件の影響は大きい、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ混合系の場合にはさほど影響が見られなかった。また後養生の乾燥環境下における収縮ひずみは、早強ポルトランドセメントや高炉スラグ微粉末混合系では高温履歴の影響をさほど受けなが、普通ポルトランドセメントやフライアッシュ混合系の場合には影響を大きく受けることが分かった。

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

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⁾。

本研究では、PCa 製品の高品質化、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、PCa 製品を想定した温度履歴を与えたコンクリートの高温履歴時における膨張収縮挙動および後養生時における収縮性状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。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

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、凍害を受ける恐れのない地域で使用され

る PCa 製品を想定した Non-AE コンクリートでは高性能減水剤を、現場打ちコンクリートを想定した AE コンクリートでは AE 減水剤を用いた。表-1 に使用材料の詳細を示す。

(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 コンクリートでは水結合材比 40%、細骨材率 37%、目標空気量 2.0%とした。現場打ちコンクリートを想定した AE コンクリートでは水結合材比 55%、細骨材率 40%、目標空気量 4.5%とした。いずれにおいても単位水量は 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。練り混ぜ後、100×100×400mm の型枠に打設を行った。

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、降温速度、後養生方法を変化させた。前置時間は 3 時間または 30 分、降温速度は 4.5℃/h (徐冷) または急冷、後養生方法は気中養生(気温 20℃、湿度 60%)、水中養生(20℃)、膜養生とした。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体を 20℃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

*1 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)

*2 長崎大学 大学院工学研究科総合工学専攻 (学生会員)

*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
	AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオールとの複合体
	AE 剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
	フライアッシュ用 AE 剤	高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体

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 ^{*1}
H40	H				413	—	647	1188	1.03 ^{*1}
NB40	NB				268	145	644	1182	0.83 ^{*1}
NF40	NF				330	83	638	1172	0.62 ^{*1}
N55	N	55%	40%		300	—	711	1171	3.00 ^{*2} /0.06 ^{*3}
H55	H				300	—	711	1171	3.00 ^{*2} /0.06 ^{*3}
NB55	NB				195	105	709	1167	3.00 ^{*2} /0.06 ^{*3}
NF55	NF				240	60	704	1159	3.00 ^{*2} /0.48 ^{*4}

※*1 高性能減水剤 *2 AE 減水剤 *3AE 剤 *4 フライアッシュ用 AE 剤

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 (℃/h)	最高温度 (℃)	最高温度 保持時間(h)	降温速度 (℃/h)	後養生方法 (材齡 1 日以降)
【A-D】	蒸気養生	3	20	65	4	4.5	気中養生 (20℃, R.H.60%)
【D-D】		0.5				急冷	
【A-W】		3				4.5	水中養生 (20℃)
【A-M】							膜養生 (20℃, R.H.60%)
【I-D】	保温養生(24h)						気中養生 (20℃, R.H.60%)
【S】	封緘養生(20℃, 24h)						水中養生 (20℃)

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。

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、所定の後養生を行った。後養生方法は、気中養生、蒸気養生後の降雨などによる水分供給の影響を検討するために常に水分が供給される水中養生、またコンクリート中からの水分逸散を抑制して、水和反応を継続させることを意図した膜養生とした。水中養生は材齢 7 日まで継続した。膜養生は脱型直後にコンクリート表面に有機無機複合型被膜養生剤²⁾を 1m²あたり 200g 刷毛で塗布した。蒸気養生、保温養生に加え、高温履歴を

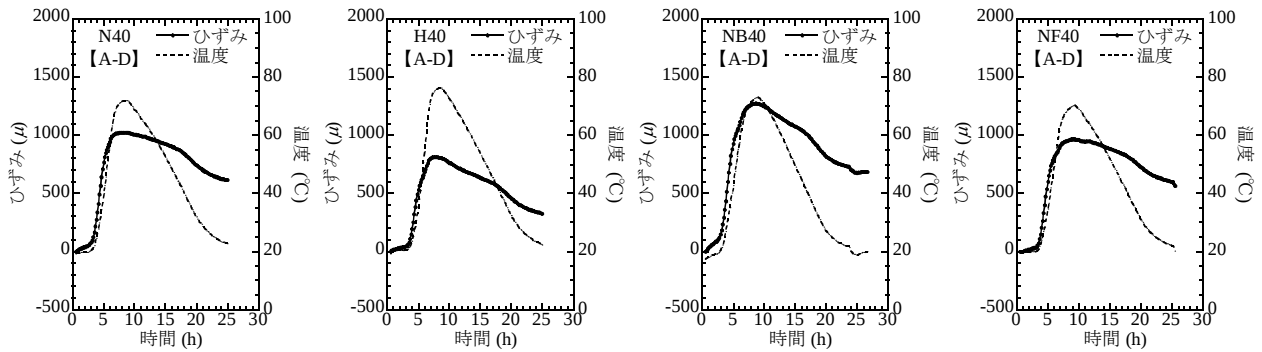


図-1 養生条件【A-D】の高温履歴時における膨張収縮挙動

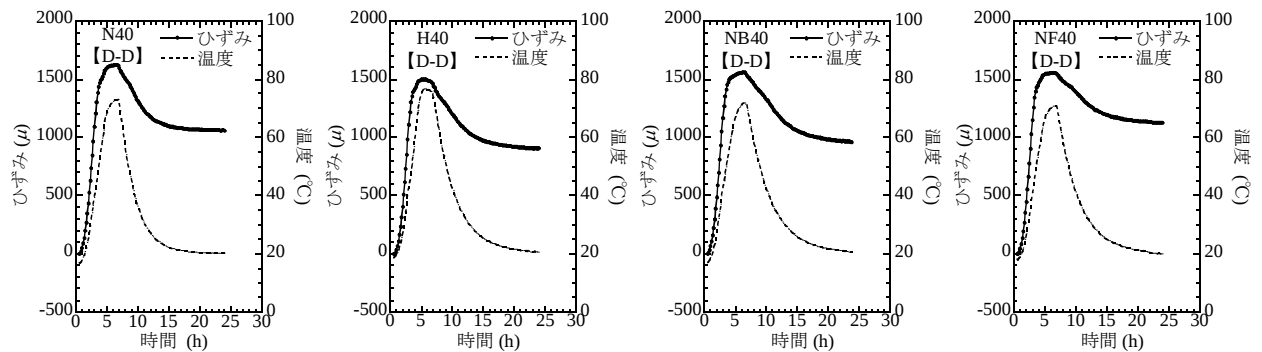


図-2 養生条件【D-D】の高温履歴時における膨張収縮挙動

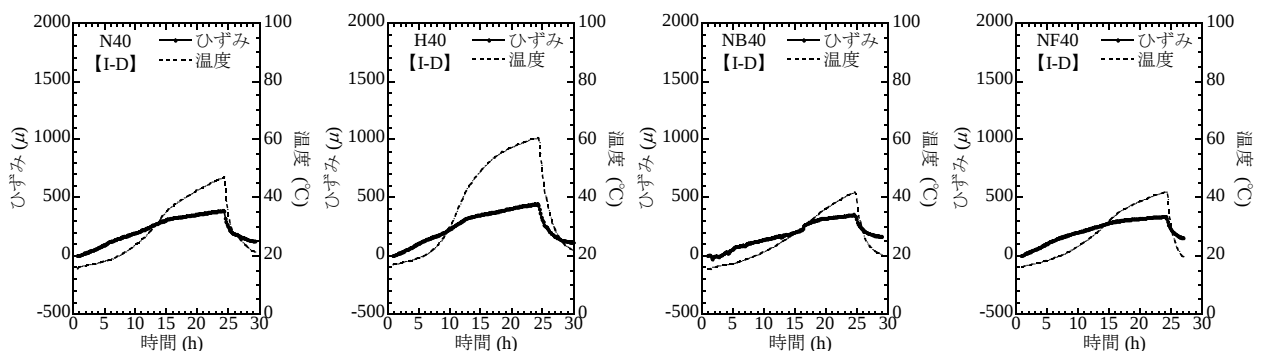


図-3 養生条件【I-D】の高温履歴時における膨張収縮挙動

与えない標準養生【S】も実施した。

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) 高温履歴時における膨張収縮ひずみ

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、打設直後から脱型後 20℃一定までのひずみをモールドゲージにより測定した。同時に、熱電対により温度履歴の測定も行った。

(2) 後養生時の乾燥環境下における収縮ひずみ

高温履歴時における膨張収縮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。乾燥環境は室温 20℃、湿度 60%とした。

3. 実験結果および考察

3.1 高温履歴時における膨張収縮挙動

養生条件【A-D】、【D-D】、【I-D】における高温履歴時の膨張収縮ひずみと温度履歴の測定結果を、それぞれ図-1、図-2、図-3 に示す。いずれの養生条件においても、ひずみの測定は注水後 30 分より開始した。

高温履歴別に結合材種類が膨張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】の場合では、最高温度到達時の最大膨張ひずみは結合材種類の影響を大きく受け、最も小さい H40 では 820 μm 程度であったが、最も大きい NB40 では 1270 μm 程度となった。これは、前置時間を 3 時間としている蒸気養生条件

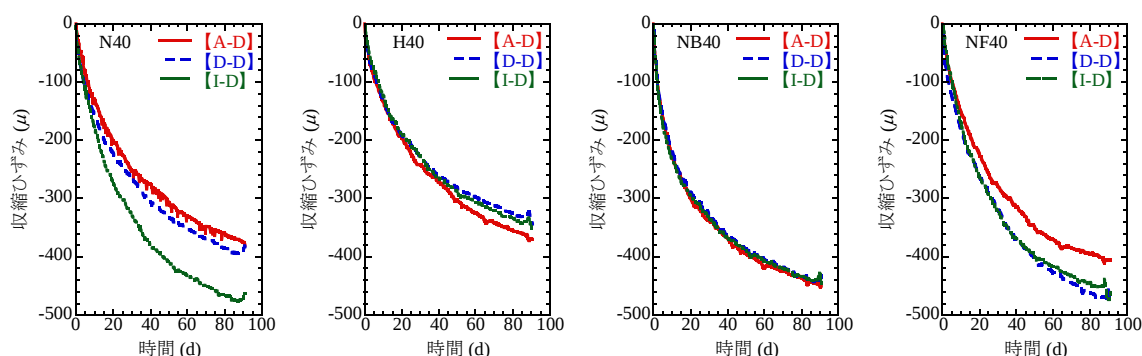


図-4 養生条件【A-D】，【D-D】，【I-D】の後養生時の乾燥環境下における収縮ひずみ

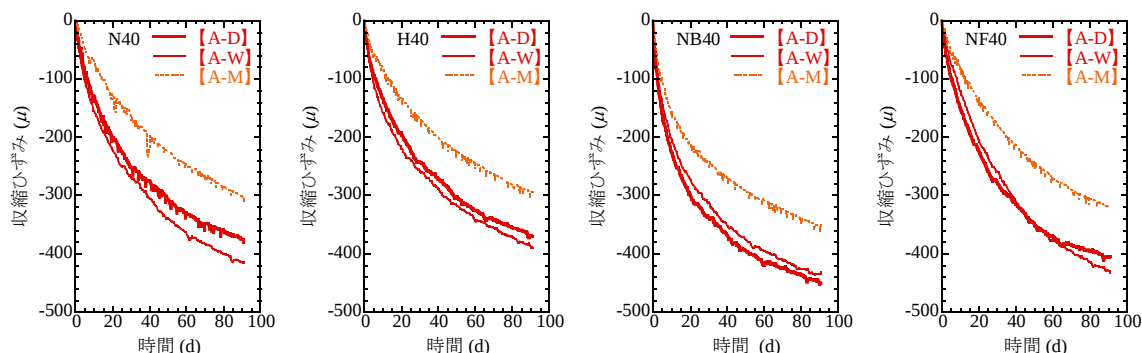


図-5 養生条件【A-D】，【A-W】，【A-M】の後養生時の乾燥環境下における収縮ひずみ

であるため、結合材種類により昇温過程時のコンクリートの凝結・硬化の程度に差があり、熱膨張係数が大きく異なっていたためと考えられる。【D-D】の場合には、最大膨張ひずみに結合材種類の影響はさほどみられず、1500～1600 μ 程度であった。これは、前置時間が0.5時間の蒸気養生条件であるため、いずれの配合においてもコンクリートの凝結が進む前に高温履歴を受けることになり、熱膨張係数にさほど差がなかったためと推察される。また、【I-D】の場合には、コンクリートの自己発熱により高温履歴を与えているために、結合材種類により最高温度に大きな差があり、それに伴って最大膨張ひずみも異なるものの、350～450 μ 程度であった。

最大膨張ひずみと降温後20℃におけるひずみの差を温度収縮ひずみとすると、【A-D】の場合には、N40、NF40では400 μ 程度、H40では500 μ 程度、NB40では600 μ 程度となった。【D-D】の場合には、N40、H40、NB40では550～600 μ 程度、NF40では430 μ 程度となり、NF40の場合を除いてほぼ同等の温度収縮ひずみとなった。

【I-D】の場合には、H40では350 μ 程度、N40では250 μ 程度、NB40、NF40では200 μ 弱となり、最高温度が大きく最大膨張ひずみの大きかったH40の温度収縮ひずみが大きくなった。

結合材別に高温履歴が膨張収縮ひずみに及ぼす影響を見てみると、蒸気養生条件が異なる【A-D】の場合と【D-D】の場合を比較すると、N40やH40では【D-D】の場合の方が100～150 μ 程度温度収縮ひずみが大きく

なった。NB40やNF40では【A-D】と【D-D】とで温度収縮ひずみに大きな差はなく、【D-D】の場合に若干大きい程度であった。蒸気養生条件が大きく異なる【A-D】と【D-D】の2パターンをみの結果からではあるが、セメント単味の配合では蒸気養生条件が温度収縮ひずみに及ぼす影響は大きく、温度応力や温度ひび割れリスクの観点からも蒸気養生条件の設定には注意を要すると言える。またいずれの結合材においても保温養生【I-D】の場合の温度収縮ひずみが蒸気養生【A-D】や【D-D】の場合に比べて小さく、温度応力や温度ひび割れリスクに対して有利な養生方法と言える。著者らの保温養生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⁾において、N40やH40では材齢1日以降で、NB40やNF40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が確かめられており、高温履歴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。

3.2 後養生時の乾燥環境下における収縮ひずみ

図-4に養生条件【A-D】，【D-D】，【I-D】の場合の乾燥開始時点をもとにした収縮ひずみの測定結果を示す。蒸気養生【A-D】と【D-D】の場合を比較すると、N40やNF40では【D-D】の方が収縮ひずみが大きい、H40では【D-D】の方が収縮ひずみが小さくなった。蒸気養生【A-D】，【D-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91日において20%程度大きくなった。

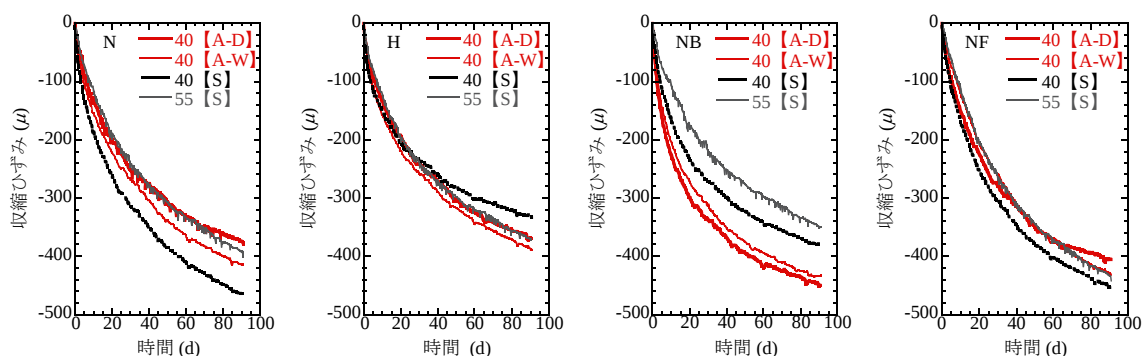


図-6 養生条件【A-D】，【A-W】，【S】の後養生時の乾燥環境下における収縮ひずみ

H40, NB40 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。NF40 では【I-D】の収縮ひずみは【D-D】と同様の傾向を示した。今後、自己収縮ひずみを測定し、収縮ひずみに占める自己収縮、乾燥収縮それぞれの割合を明確にし、より詳細な検討を行っていく予定である。

図-5 に養生条件【A-D】，【A-W】，【A-M】の場合の乾燥開始時点をもとにした収縮ひずみの測定結果を示す。なお、乾燥開始材齢は【A-D】，【A-M】においては1日，【A-W】においては7日である。いずれの結合材においても膜養生を施した【A-M】の場合の収縮ひずみが【A-D】，【A-W】に対して20%程度小さいことがわかる。また、N40やH40において【A-W】の方が収縮ひずみが大きいのは蒸気養生後に水中養生を6日間しているため、蒸気養生の過程で低下したコンクリート内部の湿度が回復し、それに伴って逸散可能水量が増加したためと考えられる。

PCa製品を想定した水結合材比40%の蒸気養生コンクリートと現場打ちコンクリートを想定した水結合材比55%の標準養生コンクリート55【S】の乾燥開始時点をもとにした収縮ひずみの比較結果を図-6に示す。N, H, NFでは40【A-D】と55【S】とではほぼ同様の収縮ひずみの経時変化挙動を示しているが、NBでは55【S】に対してNB40【A-D】，NB40【A-W】の収縮ひずみは材齢91日において30%程度大きくなった。

3.3 全収縮ひずみ

養生条件【A-D】，【D-D】，【I-D】における高温履歴時の最大膨張点を基点とした全収縮ひずみの測定結果を、それぞれ図-7，図-8，図-9に示す。なお、それぞれの図には注水後30分後のひずみを基点とした全ひずみもあわせて示している。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。

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】の場合では、N40, H40, NF40では材齢91日の全収縮ひずみが800μ程度であるにも関わらず、NB40では1000

μ程度となった。【D-D】の場合には、材齢91日の全収縮ひずみはN40, H40では950μ程度、NB40では1050μ程度、NF40では900μ程度となった。また、【I-D】の場合には、温度収縮ひずみ、後養生時の乾燥環境下における収縮ひずみの両方とも結合材種類の影響を大きく受けているものの、材齢91日の全収縮ひずみはN40では750μ程度、H40では700μ程度、NB40, NF40では650μ程度となった。

結合材別に高温履歴が全収縮ひずみに及ぼす影響を見てみると、いずれの結合材においても材齢91日の全収縮ひずみは【D-D】>【A-D】>【I-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。

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て、高温履歴時における膨張収縮挙動および後養生時の乾燥環境下における収縮性状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) 高温履歴時における最大膨張ひずみと降温後20℃におけるひずみの差を温度収縮ひずみとすると、普通ポルトランドセメントや早強ポルトランドセメントのみの場合には温度収縮ひずみに及ぼす蒸気養生条件の影響は大きい、高炉スラグ微粉末混合系やフライアッシュ混合系の場合にはさほど影響が見られなかった。
- (2) 保温養生の場合の温度収縮ひずみは蒸気養生の場合と比較して小さく、温度応力や温度ひび割れリスクに対して有利な養生方法と考えられる。
- (3) 後養生時の乾燥環境下における収縮ひずみは、結合材が早強ポルトランドセメントや高炉スラグ微粉末混合系では高温履歴の影響をさほど受けないが、普通ポルトランドセメントやフライアッシュ混合系の場合には高温履歴の影響を大きく受ける。
- (4) 後養生時の乾燥環境下における収縮ひずみに及ぼす膜養生の影響は大きく、材齢91日の収縮ひずみを

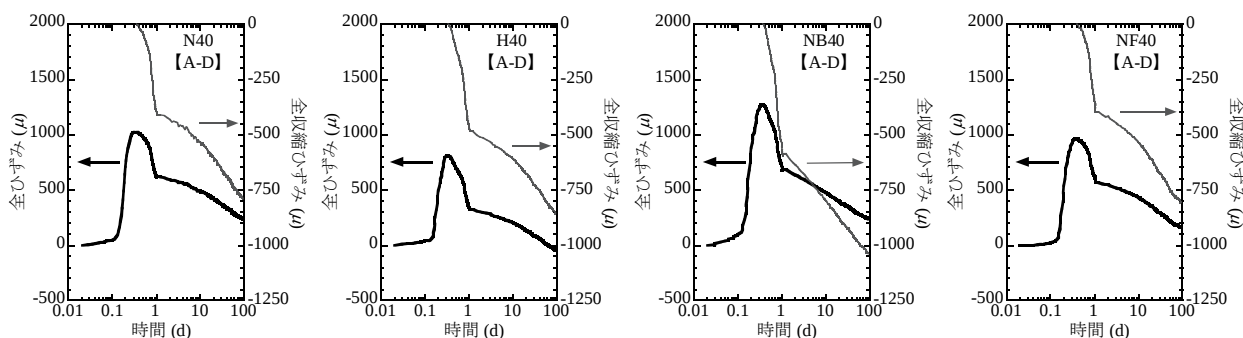


図-7 養生条件【A-D】における全ひずみと全収縮ひずみ

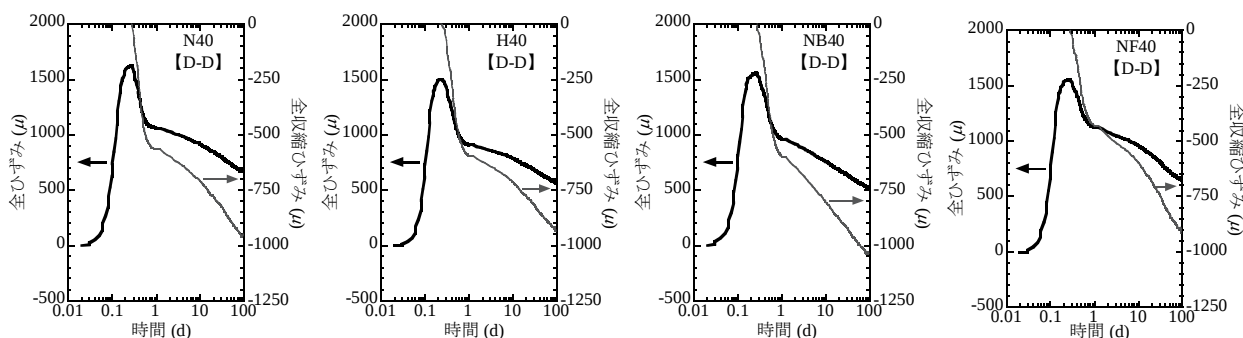


図-8 養生条件【D-D】における全ひずみと全収縮ひずみ

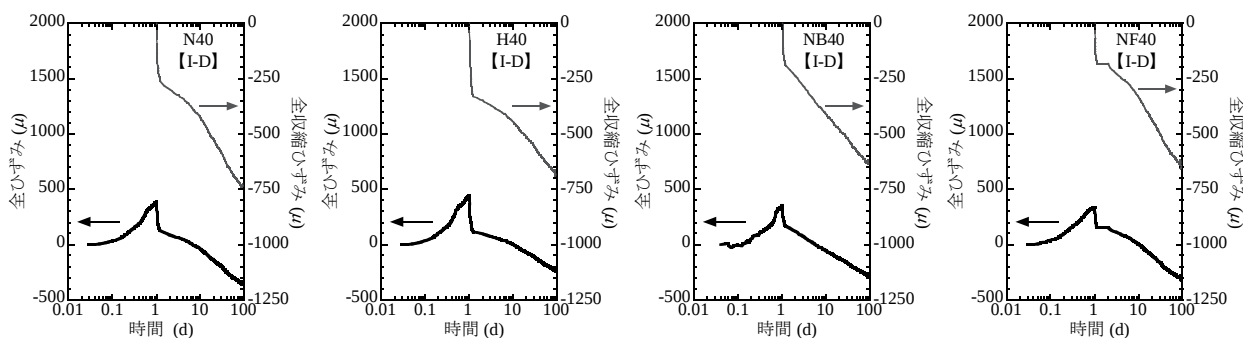


図-9 養生条件【I-D】における全ひずみと全収縮ひずみ

20%程度低減できた。

- (5) 高温履歴時の最大膨張点を基点とした全収縮ひずみは、いずれの結合材においても材齢 91 日で前置時間 0.5h, 急冷の蒸気養生条件の場合が最も大きく、保温養生の場合が最も小さくなり、最大で 40%程度の差が生じた。
- (6) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生条件下における全収縮ひずみは大きいことから、収縮ひび割れに対して特に注意を要する。

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) 盛岡実, 佐々木崇, 荒木昭俊, 木田勉: 有機-無機複合型塗膜養生剤の乾燥収縮低減効果と基礎物性, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.342-348, 2006
- 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