

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力学的特性に及ぼす結合材種類と養生条件の影響

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

要旨: 本研究では、PCa 製品を想定した高温履歴を与えた各種結合材を用いたコンクリートを対象とし、力学的特性に及ぼす温度履歴の影響、水分保持効果、長期力学的特性について検討した。その結果、本研究における材料、配合の場合、普通および早強ポルトランドセメントでは、保温養生の圧縮強度比は材齢 1 日において標準的な蒸気養生条件と同程度になり、その後も同程度の値で推移した。また、蒸気養生後に膜養生を行い水分を保持した場合、結合材の種類によって、強度増進が異なることが確認された。蒸気養生後に気中養生を行った場合の長期圧縮強度、静弾性係数は材齢 28 日と 365 日では同程度になることが確認された。

キーワード: 蒸気養生、保温養生、膜養生、圧縮強度、静弾性係数、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。

本研究では、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、各種結合材と養生条件の組合せがコンクリートの力学的特性に及ぼす影響を系統的に把握することを目的とし、実験的に検討した。中でも、PCa 製品の製造の際、多く採用されている蒸気養生だけでなく、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保温養生にも着目し、初期温度履歴や後養生方法が力学的特性に及ぼす影響について検討を行った。また、蒸気養生コンクリートに関しては、長期材齢における力学的特性についても検討を行った。特に、本研究では、これまで多くの研究^{1), 2)}がなされてきた圧縮強度だけでなく、静弾性係数にも着目した。

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 6000	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[ロット1]	密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 1.87%, 粗粒率 2.47
	海砂[ロット2]	密度 2.57g/cm ³ , 吸水率 1.35%, 粗粒率 2.44
粗骨材	碎石[ロット1]	密度 2.76g/cm ³ , 吸水率 0.69%, 粗粒率 6.66
	碎石[ロット2]	密度 2.81g/cm ³ , 吸水率 0.65%, 粗粒率 6.57
混和剤	高性能減水剤(シリーズI)	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	AE 減水剤(シリーズII)	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE 剤 (シリーズII)	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 (シリーズII)	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

*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-2 示方配合

	記号	結合材種類	水結合材比 W/(C+SCM)	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	
シリーズ I	N40	N	40%	37%	165	413	—	648	1189	0.83 ^{*1}	
	H40	H				413	—	647	1182	1.03 ^{*1}	
	NB4035	NB				268	145	644	1182	0.83 ^{*1}	
	NF4020	NF				330	83	638	1172	0.62 ^{*1}	
シリーズ II	N55	N	55%	40%	165	300	—	711	1171	3.00 ^{*2}	0.06 ^{*3}
	H55	H				300	—	711	1171	3.00 ^{*2}	0.06 ^{*3}
	NB5535	NB				195	105	709	1167	3.00 ^{*2}	0.06 ^{*3}
	NF5520	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

記号	養生条件	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
【A-D】	蒸気養生	3	20	65	4	4.5	気中養生 (20°C, R.H. 60%)
【B-D】		0.5					
【C-D】		3				急冷	
【D-D】		0.5					
【A-W】		3				4.5	
【A-M】	膜養生 (20°C, R.H. 60%)						
【I-D】	保温養生(24h)						気中養生 (20°C, R.H. 60%)
【A】	封緘養生(20°C, 24h)→水中養生(20°C, 48h)						
【S】	封緘養生(20°C, 24h)						水中養生(20°C)

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

表-1 に使用材料を示す。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 の混合系(65% : 35%)[NB], Nとフライアッシュの混合系(80% : 20%)[NF]の4種類とした。細骨材には海砂を、粗骨材には砕石を用いた。なお、骨材においては、一部の養生条件において異なるロットを用いた。詳細は2.2 養生条件に示す。本研究で対象とするコンクリートは、PCa製品を想定したシリーズIと現場打ちコンクリートを想定したシリーズIIに大別される。シリーズIは高性能減水剤を用いる Non-AE コンクリートとし、シリーズIIはAE減水剤を用いる AE コンクリートとした。

(2) 配合

表-2 にコンクリートの示方配合を示す。シリーズIのコンクリートは水結合材比40%, 細骨材率37%, 目標空気量2.0%とし、シリーズIIは水結合材比55%, 細骨材

率40%, 目標空気量4.5%とした。シリーズI, シリーズIIの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8.0cmとなるよう適宜混和剤の添加量を調整した。練り混ぜ後、φ100×200mmのブリキ製軽量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。なお、シリーズIIの配合では標準養生【S】のみ実施した。

(1) 蒸気養生

蒸気養生は、前置時間、降温速度、後養生方法に着目して検討を行った。前置時間は3時間または30分、降温速度は4.5°C/h(徐冷)または急冷、後養生方法は気中養生(気温20°C, 湿度60%), 水中養生(20°C), 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°Cの恒温室

に移動させることにより行った。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て膜養生【A-M】とした。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³⁾を1m²あたり200g刷毛で塗布した。

(2) 保温養生

図-1に保温養生の模式図を示す。本研究では、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、保温養生槽内の隙間をなくすために発泡ビーズを入れた。

なお、本研究において骨材は、養生条件【A-M】、【I-D】、【A】ではロット2を使用し、それ以外ではロット1を使用した(表-1を参照)。

2. 3 実験項目

(1) 圧縮強度

圧縮強度は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従い測定した。練混ぜ開始より24±0.5時間後に脱型を行い、ただちに材齢1日の圧縮強度を測定した。材齢7, 14, 28, 365日の圧縮強度は、所定の後養生(表-3を参照)を行った後に測定した。

(2) 静弾性係数

静弾性係数は、圧縮強度試験と同時に、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に従い、コンプレッソメータによりひずみの測定を行い、静弾性係数を算出した。

3. 実験結果および考察

本研究では、骨材のロットが異なるものがあるため、比較対象によっては単純に圧縮強度、静弾性係数では比較できないものがある。その場合には、各供試体作製時に同バッチから作製した標準養生の材齢28日圧縮強度および静弾性係数との比率で比較、検討を行う。

3. 1 温度履歴による力学的特性への影響

図-2に、各結合材種類ごとに、標準的な蒸気養生条件【A-D】、最も早いサイクルの蒸気養生条件【D-D】、そして保温養生【I-D】を行った時のコンクリート温度の測定結果を示す。保温養生【I-D】では、いずれの結合材においても、保温養生槽内の位置によってコンクリート温度履歴に差が生じた。保温養生【I-D】における最高温度は、結合材により異なりH>N>NB>NFの順に高くなった。特にHの場合は、他の結合材に比べコンクリートの最高温度が高く、保温養生槽内内側では10℃以上高

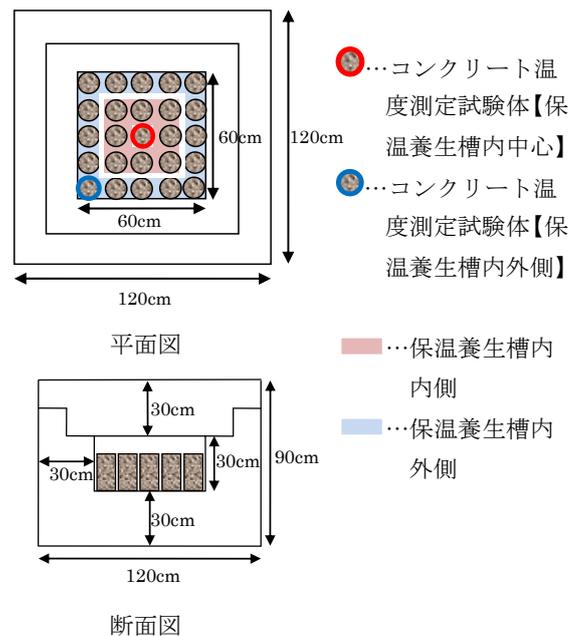


図-1 保温養生槽概略図

くなった。

図-3に、圧縮強度比に及ぼす結合材種類と温度履歴の影響を示す。保温養生【I-D】については、保温養生槽内で温度履歴に差が生じ、その影響により圧縮強度が異なることを懸念して、各材齢において保温養生槽内内側試験体1本と保温養生槽内外側試験体2本の圧縮強度試験を行った。しかし、圧縮強度の差は、内側と外側とでほぼ1N/mm²以下であったため、以下では保温養生槽内内側試験体1本と保温養生槽内外側試験体2本の平均値で検討を行った。結合材がN, Hの場合、保温養生【I-D】の圧縮強度比は材齢1日において、標準的な蒸気養生【A-D】を行ったものと同程度となり、材齢が経過しても同じ傾向を示した。一方、結合材がNB, NFの場合、保温養生【I-D】が蒸気養生【A-D】、【D-D】よりも材齢1日の圧縮強度比が小さくなった。しかし、保温養生【I-D】は材齢7日までの強度増進が大きく、材齢7日以降は標準的な蒸気養生【A-D】と同程度の圧縮強度比となった。

図-4に、各結合材種類ごとに、マチュリティと圧縮強度比の関係を示す。なお、保温養生のマチュリティは、保温養生槽内の位置でコンクリート温度履歴が異なりマチュリティに差が生じるが、その差は最大でも50℃・hであったため保温養生槽内中心のマチュリティと保温養生槽内外側のマチュリティの平均とした。いずれの結合材においても、一部の養生条件の材齢1日を除いて圧縮強度比とマチュリティに相関があることがわかる。しかし、本研究では限られた3パターンのみでの比較なので、今後より広範囲な養生条件、例えば最高温度や最高温度保持時間などが異なる蒸気養生などにおいて、より詳細

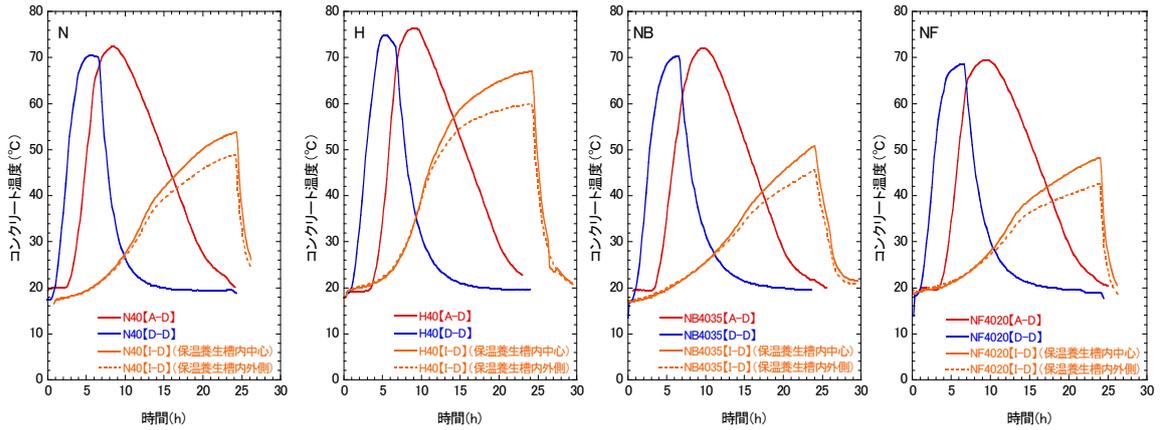


図-2 代表的な温度履歴を受けたコンクリート温度

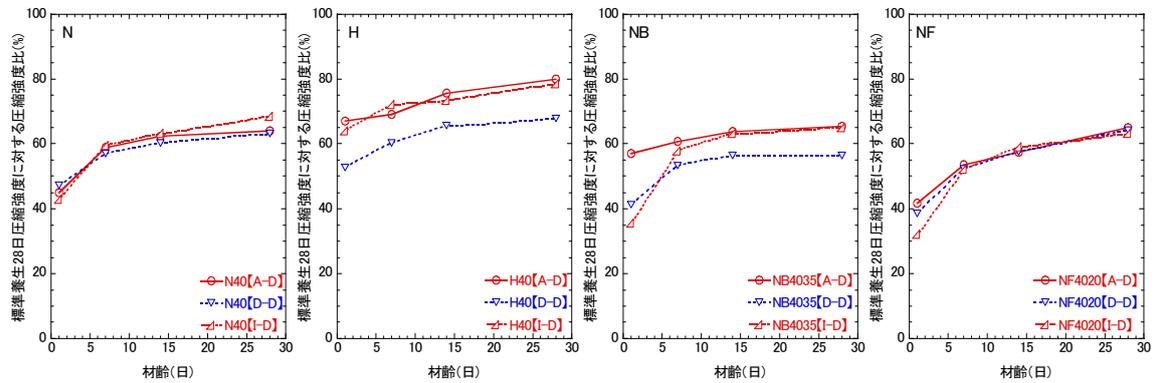


図-3 圧縮強度比に及ぼす結合材種類と温度履歴の影響

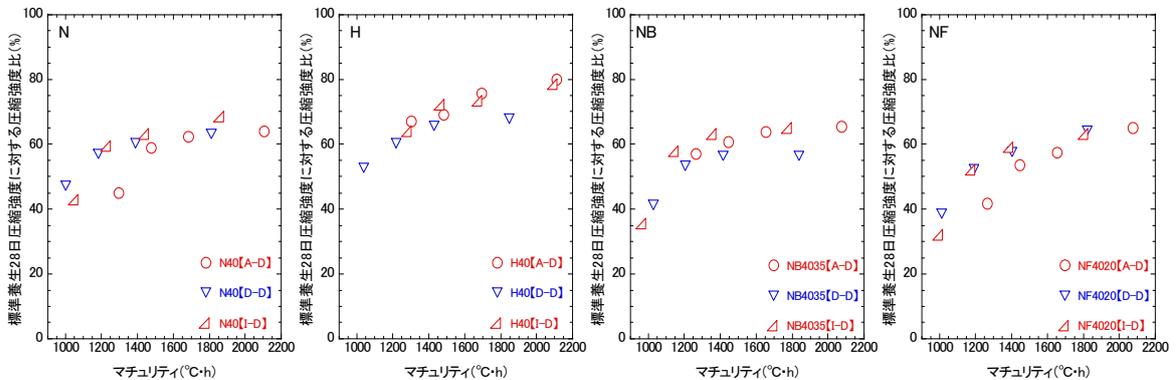


図-4 マチュリティ(基準10°C)と圧縮強度比の関係

な検討を行う必要がある。

3. 2 水分供給, 水分保持による力学的特性への影響

図-5 に、各結合材種類ごとに、圧縮強度比に及ぼす水中養生による水分供給と膜養生による水分保持の影響を示す。いずれの結合材においても、蒸気養生後に水中養生をした【A-W】が蒸気養生後に気中養生をした【A-D】や膜養生をした【A-M】よりも強度増進が大きく、材齢7日以降の圧縮強度比が大きくなっている。また、いずれの結合材においても、蒸気養生後に膜養生をした【A-M】では、材齢7日までは蒸気養生後に水中養生をした【A-W】と同等の圧縮強度比となった。結合材がN,

NFの場合、蒸気養生後に膜養生をした【A-M】では、材齢7日以降の強度増進が見られ、蒸気養生後に水中養生をした【A-W】と気中養生をした【A-D】の中間の圧縮強度比となった。一方、結合材がH, NBの場合、材齢7日以降、蒸気養生後に膜養生【A-M】を行っても強度増進が見られず、蒸気養生後に気中養生をした【A-D】と同程度の圧縮強度比となった。

3. 3 蒸気養生コンクリートの長期力学的特性

図-6 に、圧縮強度に及ぼす結合材種類と蒸気養生条件の影響を示す。いずれの結合材においても、蒸気養生を行ったものは、標準養生よりも初期の圧縮強度が大き

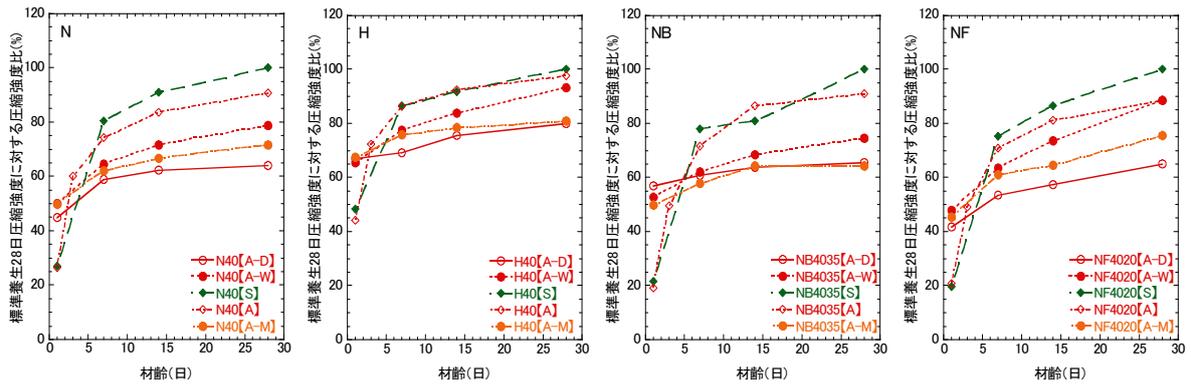


図-5 圧縮強度比に及ぼす水分供給、水分保持の影響

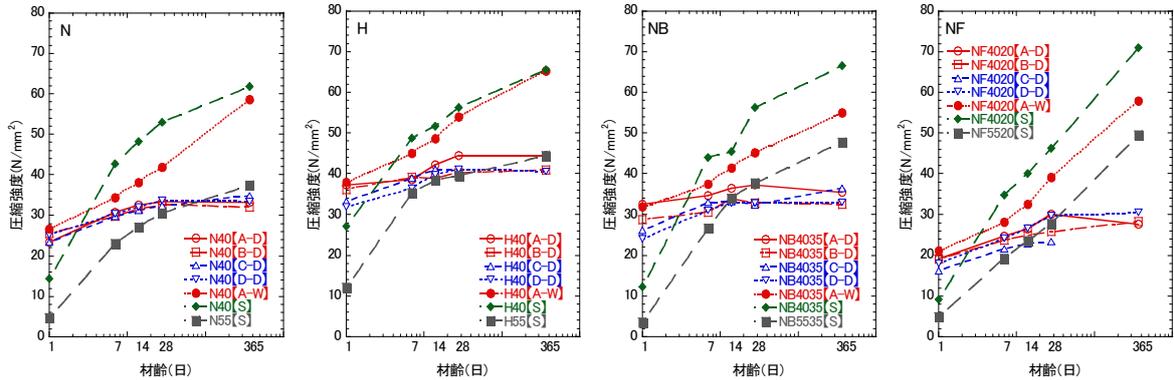


図-6 圧縮強度に及ぼす結合材種類と蒸気養生条件の影響

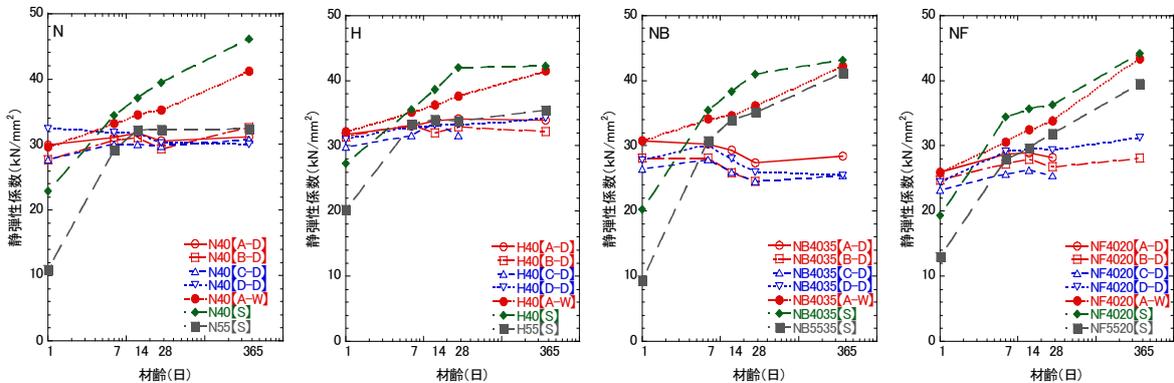


図-7 静弾性係数に及ぼす結合材種類と蒸気養生条件の影響

くなっているものの、材齢7日以降下回る結果となった。また、蒸気養生後に気中養生の場合、強度増進があまり見られず、材齢28日と材齢365日の圧縮強度はほぼ同程度もしくは、小さくなった。一方、蒸気養生後に水中養生をした【A-W】では、いずれの結合材においても強度増進が見られ、特に結合材がHでは、材齢7日以降で標準養生に近い圧縮強度を示している。また、いずれの結合材においても材齢365日では、蒸気養生後に水中養生をした【A-W】が圧縮強度が50N/mm²を超える結果となった。また、PCa製品を現場打ちコンクリートの代替として使用することを念頭に、PCa製品の出荷時強度(材齢14日または28日の圧縮強度)と同程度の圧縮強度(材

齢28日)となる現場打ちコンクリートを想定したW/B=55%、標準養生した試験体を比較対象として、蒸気養生コンクリートの長期的な力学的特性について検討した。結合材がNで蒸気養生後に気中養生した場合、材齢28日までは現場打ち想定よりも大きい圧縮強度を示したが、材齢365日では若干下回る結果となった。結合材がHで蒸気養生後に気中養生した場合、材齢7日以降で現場打ち想定と同程度の圧縮強度となり、標準的な蒸気養生条件【A-D】では材齢365日においても同程度の圧縮強度を示したが、【B-D】、【C-D】、【D-D】では、材齢365日では下回る結果となった。結合材がNB、NFで蒸気養生後に気中養生した場合、材齢14日で現場打ち想定

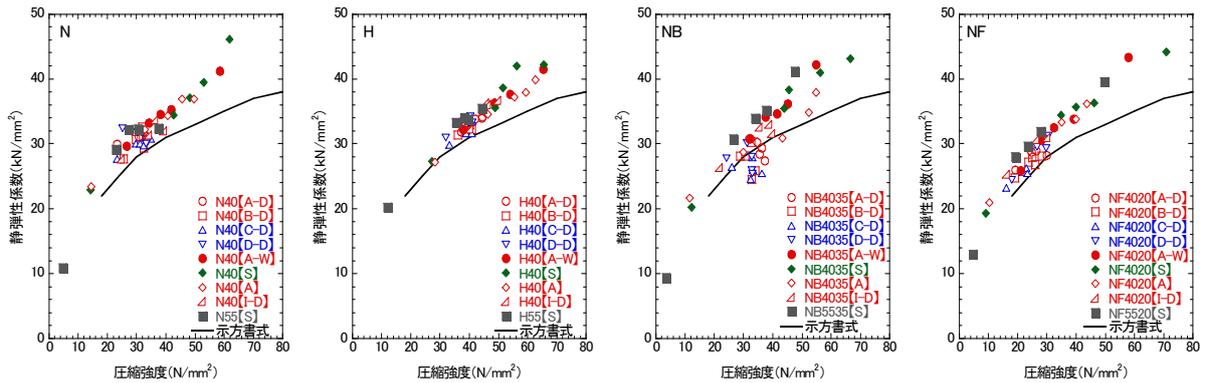


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

と同程度の圧縮強度となり、材齢 28 日で【B-D】、【C-D】、【D-D】では下回り、材齢 365 日では、現場打ち想定 of 圧縮強度が蒸気養生後に気中養生した場合よりも NB では 15N/mm^2 程度、NF では 25N/mm^2 程度大きくなった。図-7 に、静弾性係数に及ぼす結合材種類と蒸気養生条件の影響を示す。いずれの結合材においても、標準養生の場合や蒸気養生後に水中養生を行ったものは、材齢の経過とともに静弾性係数が大きくなった。一方、蒸気養生後に気中養生を行ったものは、材齢 7 日以降静弾性係数の値の増加は見られず、ほとんど変化しないもしくは低下傾向を示している。特に、結合材が NB の場合、材齢 7 日から材齢 28 日における静弾性係数の低下は著しく、蒸気養生およびその後の養生の過程において、内部損傷を受けていることが推察される。この結果と同様の結果は、細田らの研究⁴⁾によっても明らかにされており、微視的温度応力の観点から検討がなされている。しかし、材齢 28 日と材齢 365 日では静弾性係数はほぼ変わらない値となっており、静弾性係数の低下傾向は材齢 28 日までであることが確認された。

図-8 に各結合材種類ごとに、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。参考に土木学会コンクリート標準示方書の圧縮強度と静弾性係数の関係式を合せて示した。結合材が N, H, NF の場合、養生条件によらず圧縮強度と静弾性係数の関係はほぼ同一の関係となった。結合材が NB の場合には、蒸気養生後に気中養生を行ったものにおいて、圧縮強度の増進にも関わらず静弾性係数が低下する現象が見られたことから、他の結合材ほど高い相関は認められない結果となった。

4. まとめ

本研究により、以下のことが明らかとなった。

- 1) 本研究の材料、配合においては、保温養生の圧縮強度比は普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントでは、材齢 1 日から、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを

混合したものでは材齢 7 日から標準的な蒸気養生と同程度の圧縮強度比となることが確認された。

- 2) いずれの結合材においても、蒸気養生後に膜養生を行い水分保持をすると材齢 7 日までは蒸気養生後に水中養生をした場合と同程度の圧縮強度比となった。普通ポルトランドセメントのみやフライアッシュを用いた場合は材齢 7 日以降も強度増進が見られることが確認された。
- 3) いずれの結合材においても蒸気養生後に気中養生を行った場合、材齢 28 日と材齢 365 日で圧縮強度は同程度となった。静弾性係数については、経時的な上昇はさほど見られず、特に高炉スラグ微粉末を用いた場合には材齢 7 日から材齢 28 日まで静弾性係数の顕著な低下が起こるが、材齢 28 日と材齢 365 日とは同程度の値となることが確認された。

謝辞

本研究は、九州コンクリート製品協会の支援により実施しました。ここに付記し、心から感謝の意を表します。

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，2009.8
- 2) セメント協会：蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響，コンクリート専門委員会報告 F-53，2006.3
- 3) 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，Vol.60，pp.342-348，2006
- 4) 細田 暁，藤原浩一，青木千里：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの力学的特性に対する微視的温度応力の影響，土木学会論文集 E，Vol.63，No.4，pp.549-561，2007.10