

論文 蒸気養生を模擬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養生条件と結合材種類の影響

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

要旨：本研究では、蒸気養生を模擬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養生条件と結合材種類の影響を実験的に検討した。その結果、結合材種類により圧縮強度に及ぼす蒸気養生条件の変化の影響の程度は異なり、前置時間が短い場合には標準的な蒸気養生条件の場合と比べて著しく強度低下する場があることが確認された。また、圧縮強度と静弾性係数の関係は、標準養生の場合も含めて、蒸気養生条件や結合材種類に関わらずほぼ同一の関係となるものの、静弾性係数が経時的に低下する結合材種類と蒸気養生条件の組合せがあることを明らかにした。

キーワード：蒸気養生、圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数、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、各種結合材を用いた蒸気養生コンクリートの力学的特性を系統的に把握することを目的に、蒸気養生コンクリートの力学的特性に及ぼす養生条件と結合材種類の影響を

実験的に検討した。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、静弾性係数および動弾性係数にも着目して検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

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。細骨材は海砂、粗骨材は碎石を用い、混和剤としては高性能減水剤を使用し、Non-AEコンクリートとした。表-1に使用材料を示す。コンクリートの練上り温度が全ての場合において20℃一定となるように、各材料を恒温室に保管し、一定の温度とした後に練混ぜを行った。

(2) 配合

表-2にコンクリートの示方配合を示す。結合材種類

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

*1 長崎大学 工学部構造工学科助教 博(工) (正会員)

*2 (株)ヤマウ 技術本部開発・設計部 (正会員)

*3 長崎大学 工学部構造工学科教授 工博 (正会員)

*4 長崎大学 工学部構造工学科技術職員 (正会員)

表-2 示方配合

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	高性能 減水剤 AD
N	40%	37%	165	413	—	648	1189	0.83
H				413	—	647	1188	1.03
NB				268	145	644	1182	0.83
NF				330	83	638	1172	0.62

表-3 養生条件

養生条件	前置時間	昇温速度	最高温度	保持時間	降温速度	後養生方法
A-D	3h	20℃/h	65℃	4h	4.5℃/h	気中
A-W						水中
B-D	0.5h				急冷	気中
C-D						気中
標準	標準養生（20℃，水中養生）					

に関わらず、水結合材比 40%、単位水量 165kg、細骨材率 37%とした。目標スランブを 8cm、空気量を 2%とし、スランブは高性能減水剤の添加量により調整した。

2.2 養生条件

表-3 に養生条件を示す。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%)または水中養生(20℃)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。前置時間と降温速度の変化は、土木学会コンクリート標準示方書に書かれている常圧蒸気養生の標準的な条件(養生条件 A-D, A-W)と、前置時間を短くした条件(養生条件 B-D)、降温速度を急冷とした条件(養生条件 C-D)とを比較することを目的に設定した。後養生方法は、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、気中養生と常に水分が供給される水中養生とした。蒸気養生に加えて、標準養生も実施した。

2.3 実験項目

(1) フレッシュ性

フレッシュ性は、JIS A 1101 「コンクリートのスランブ試験方法」、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」、JIS A 1156 「フレッシュコンクリートの温度測定方法」に従い、

スランブ、空気量、練上り温度を測定した。

(2) 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。供試体の寸法は、φ100×200mm とした。練混ぜ開始より 22~24 時間後に脱型を行い、所定の養生を行った後、材齢 1, 7, 14, 28 日において試験を実施した。

(3) 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、コンプレッション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。

(4) 動弾性係数

動弾性係数は、JIS A 1127 「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」に従い、縦振動の一次共鳴振動数を測定し、次式(1)により算出した。

$$E_D = \left(4.0 \times 10^{-3} \times \frac{L}{A} \right) \times m \times f^2 \quad (1)$$

ここに、 E_D : 動弾性係数(N/mm²)

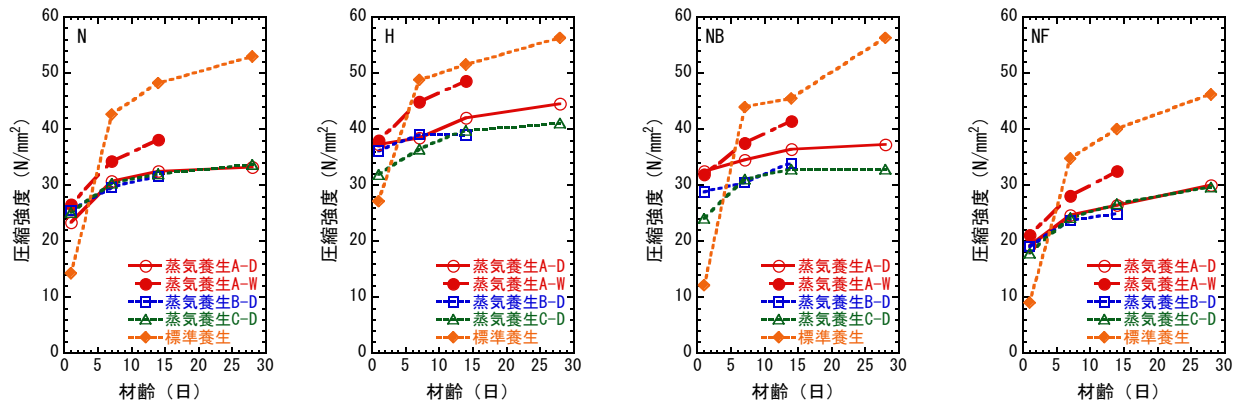
L : 供試体の長さ(mm)

A : 供試体の断面積(mm²)

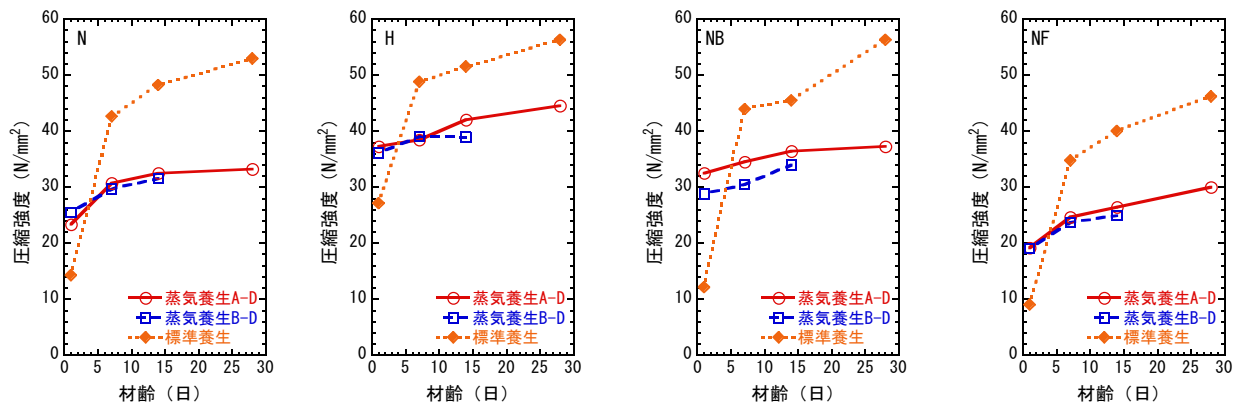
m : 供試体の質量(kg)

f : 縦振動の一次共鳴振動数(Hz)

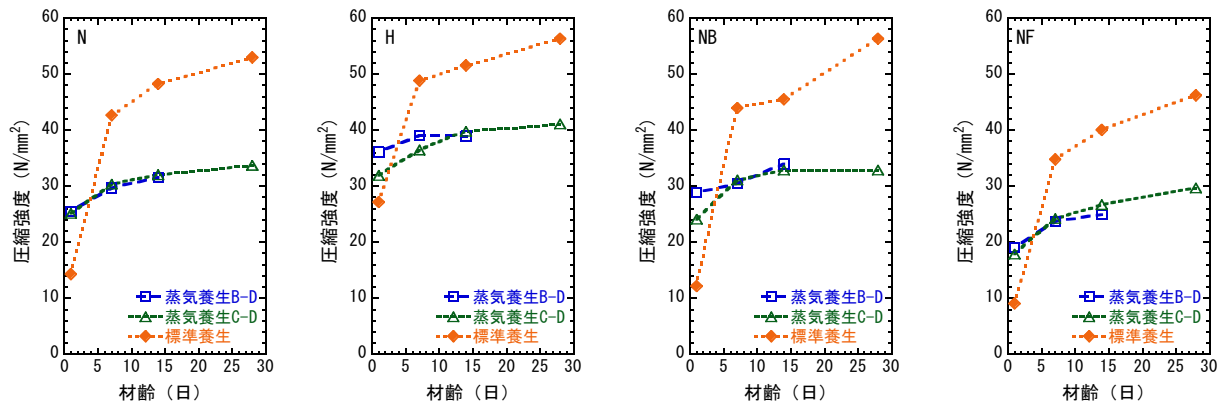
供試体は、圧縮強度試験と同一のものであり、圧縮強度試験の実施直前に動弾性係数の測定を行った。



図－１ 圧縮強度に及ぼす蒸気養生条件と結合材種類の影響



図－２ 圧縮強度に及ぼす前置時間の影響



図－３ 圧縮強度に及ぼす降温速度の影響

3. 実験結果および考察

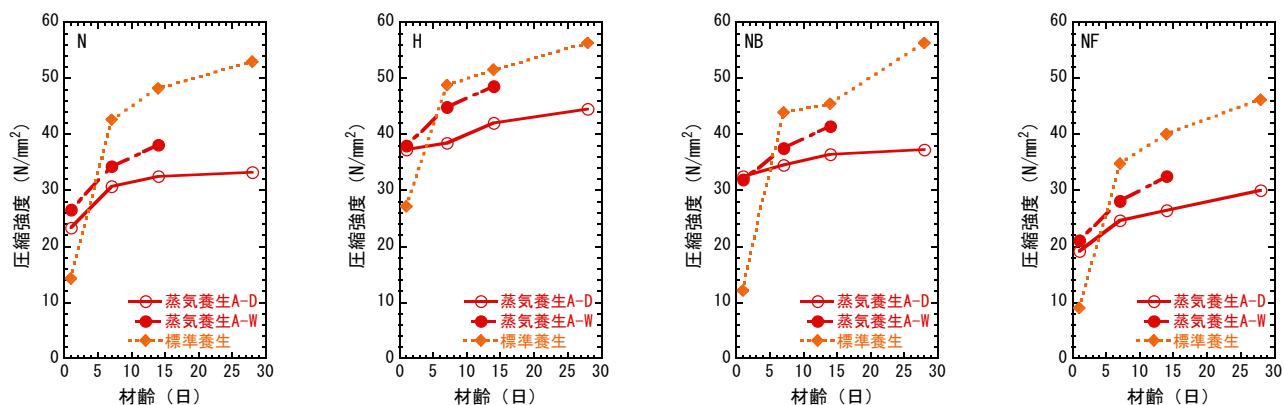
3.1 圧縮強度

図－１に、各結合材種類ごとに、圧縮強度に及ぼす蒸気養生条件の影響を示す。いずれの結合材においても、標準養生の場合に比べて、蒸気養生により圧縮強度は初期においては大きくなっているものの、材齢経過による強度増進は小さく、いずれの場合においても材齢 7 日において標準養生の強度を下回る結果となった。

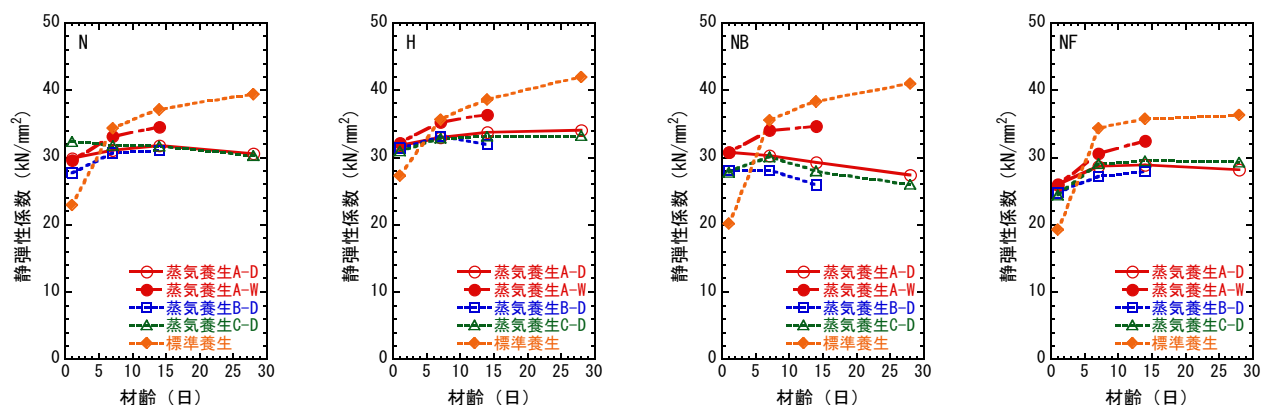
(1) 前置時間の影響

図－２に、各結合材種類ごとに、圧縮強度に及ぼす前置

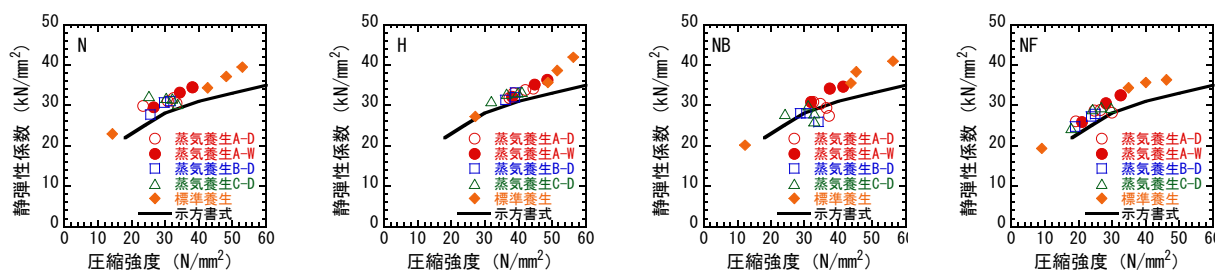
置時間の影響を示す。結合材が N, H, NF の場合には、前置時間が 3 時間の場合 (A-D) と 30 分の場合 (B-D) とで、圧縮強度の経時変化に違いは見られないが、NB の場合には、前置時間が短い場合に、明確な強度低下が確認された。NB の場合にのみ強度差が生じた理由の詳細は不明であるが、高炉スラグ微粉末の反応は温度の影響を特に大きく受けることが知られており、また水和反応の段階と昇温過程のタイミングが影響したものと思われる。



図－4 圧縮強度に及ぼす水分供給の影響



図－5 静弾性係数に及ぼす蒸気養生条件と結合材種類の影響



図－6 圧縮強度と静弾性係数の関係

(2) 降温速度の影響

図－3に、各結合材種類ごとに、圧縮強度に及ぼす降温速度の影響を示す。結合材がNやNFの場合には、降温速度が徐冷(B-D)であっても、急冷(C-D)であってもほぼ同じ圧縮強度の経時変化をしている。一方、HやNBの場合には、急冷の場合に、材齢1日において明確な強度低下が見られるものの、材齢14日になると徐冷の場合とほぼ同じ強度となった。

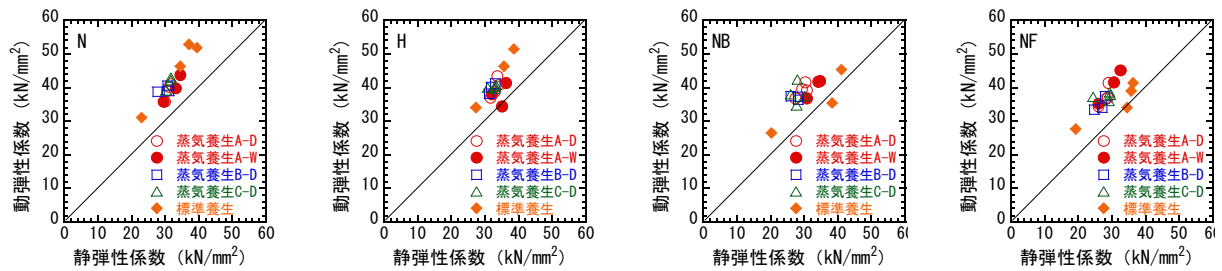
(3) 水分供給の影響

図－4に、各結合材種類ごとに、圧縮強度に及ぼす後養生時の水分供給の影響を示す。いずれの結合材においても、後養生時の水分供給により圧縮強度は気中養生の

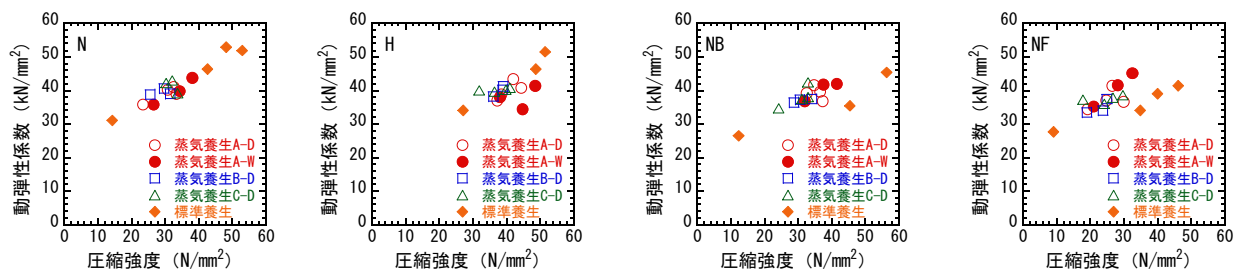
場合に比べて増進している。特に、結合材がHやNBの場合には、材齢14日において標準養生とほぼ同等の圧縮強度を示している。

3.2 静弾性係数

図－5に、各結合材種類ごとに、静弾性係数に及ぼす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の場合における静弾性係数の低下は著しく、蒸気養生お



図－７ 静弾性係数と動弾性係数の関係



図－８ 圧縮強度と動弾性係数の関係

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³⁾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。今後、より長期的な材齢においても測定を行う予定であり、収縮性状や耐久性の観点からも検討を行っていく予定である。

図－６に、各結合材種類ごとに、圧縮強度と静弾数の関係を示す。図には、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。いずれの結合材においても、標準養生の場合も含めて蒸気養生条件によらず、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。ただし、図－５に示したように結合材が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、他の結合材の場合と比較してバラツキの大きな結果となった。また、土木学会コンクリート標準示方書における圧縮強度と静弾性係数の関係と比較すると、本研究において得られた静弾性係数は若干大きいものの、圧縮強度と静弾性係数の関係に及ぼす結合材種類や養生条件の影響は小さくなく、結合材がNBで、蒸気養生後に気中養生を行った場合を除き、ほぼ同一の関係となった。

3.3 動弾性係数

図－７に、各結合材種類ごとに、静弾性係数と動弾性係数の関係を示す。いずれの結合材においても、全体的に動弾性係数が静弾性係数よりも大きな値となってい

る傾向は共通している。結合材がNとHの場合には、標準養生の場合も含めて養生履歴に関わらず、静弾性係数と動弾性係数の関係は、ほぼ同一の関係を示している。一方、NBとNFの場合には、標準養生の場合と比較して、蒸気養生の場合には、静弾性係数が小さな値を示している傾向が確認される。

図－８に、各結合材種類ごとに、圧縮強度と動弾性係数の関係を示す。図－７の静弾性係数と動弾性係数の関係より、結合材がNとHの場合には、標準養生の場合も含めて養生履歴に関わらず、圧縮強度と動弾性係数の関係は、ほぼ同一の関係を示している。一方、NBとNFの場合には、標準養生の場合と比較して、蒸気養生の場合には、動弾性係数が大きな値を示している傾向が確認される。N、Hの場合と、NB、NFの場合とで傾向が異なる理由の詳細は不明であるが、混和材の混入、蒸気養生履歴、気中養生による骨材界面とペーストとの界面の状態変化等が理由の一つとして考えられる。

4. まとめ

本研究では、蒸気養生を模擬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養生条件と結合材種類の影響を実験的に検討した。その結果、結合材種類により圧縮強度に及ぼす蒸気養生条件の変化の影響の程度は異なり、前置時間が短い場合には標準的な蒸気養生条件の場合と比べて著しく強度低下する場合があることが確認された。また、圧縮強度と静弾性係数の関係は、

標準養生の場合も含めて、蒸気養生条件や結合材種類に関わらずほぼ同一の関係となるものの、静弾性係数が経時的に低下する結合材種類と蒸気養生条件の組合せがあることを明らかにした。

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。本研究の実施にあたり多大なご協力を頂きました長崎大学工学部構造工学科の岡野耕大君と山口晃平君に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) 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