

3. 実験の結果

3.1 コンクリートのフレッシュ性状・強度特性検証試験

3.1.1 調合およびコンクリートのフレッシュ性状

コンクリートの調合およびフレッシュ性状を表-3.1 に示す。NN を使用したコンクリートが所定のスランプおよびスランプフローを得るために必要な混和剤量は、いずれの水セメント比においても N1、N2、N3 と同等であった。

表-3.1 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

使用セメント	水結合材比 (%)	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³) ※1					混和剤使用量 (B×%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	
			水	結合材 B		細骨材	粗骨材					
				セメント	BFS							
N	NN	65	0.59	180	277	—	904	963	1.50	19.5	—	1.0
	N1								1.40	18.5	—	1.0
	N2								1.40	19.0	—	1.0
	N3								1.40	19.0	—	1.0
	NN	55	0.59	175	318	—	883	963	1.40	18.5	—	1.0
	N1								1.40	19.5	—	1.0
	N2								1.40	19.0	—	0.8
	N3								1.40	16.5	—	0.8
	NN	55 (高流動)	0.56	175	318	—	931	914	1.55	—	48.5	1.3
	N1								1.55	—	48.0	1.1
	N2								1.55	—	45.5	1.7
	N3								1.55	—	50.5	1.1
	NN	45	0.56	175	389	—	873	914	0.90	22.0	40.0	1.2
	N1								0.90	22.0	41.0	1.3
	N2								1.25	22.5	43.0	1.3
	N3								1.20	23.5	48.0	1.2
	NN	35	0.54	175	500	—	814	881	1.10	—	69.5	1.3
	N1								1.10	—	65.5	1.6
	N2								1.35	—	55.0	1.5
	N3								1.30	—	60.0	1.3
NN	25	0.54	175	700	—	650	881	0.93	—	66.5	1.2	
N1								1.10	—	68.0	0.4	
N2								1.50	—	66.0	0.6	
N3								1.40	—	70.0	0.7	
BB	NBB	45	0.56	175	222	167	860	914	0.85	23.5	48.0	0.8
	BB1								0.85	23.0	49.5	0.9
	BB2								1.05	23.5	52.0	0.8
	BB3								0.90	23.0	49.5	1.0
	NBB	35	0.54	175	285	215	797	881	0.80	—	54.5	1.3
	BB1								0.80	—	55.0	1.0
	BB2								1.00	—	62.5	0.7
	BB3								0.90	—	55.5	1.0
	NBB	25	0.54	175	399	301	627	881	0.80	—	70.0	1.0
	BB1								0.80	—	66.0	1.0
	BB2								1.00	—	67.0	0.8
	BB3								0.95	—	67.0	0.8

※1：調合計算に用いたセメント密度は、N 3.16g/cm³、BB 3.04g/cm³一定とした。そのため、厳密には単位量 (1m³) での数値ではない場合がある。表-3.3 のセメント密度を用いた場合の各調合における容積範囲は 1.000~1.003m³であった。

3.1.2 コンクリートの圧縮強度試験

(1) 水中養生

水中養生時のコンクリートの圧縮強度試験結果を図-3.1 および図-3.2 に示す。NN を使用したコンクリートの水中養生時の圧縮強度は、いずれの水セメント比においても N1、N2、N3 と同等であった。

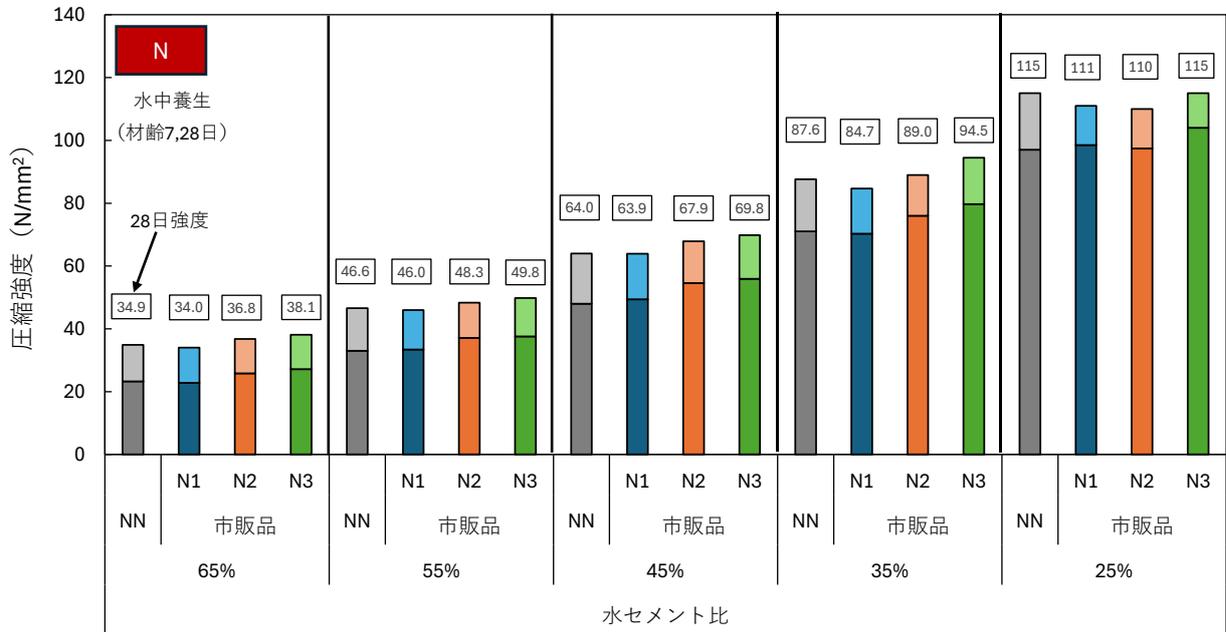


図-3.1 圧縮強度 (N-水中養生、材齢 7 日および 28 日) の結果

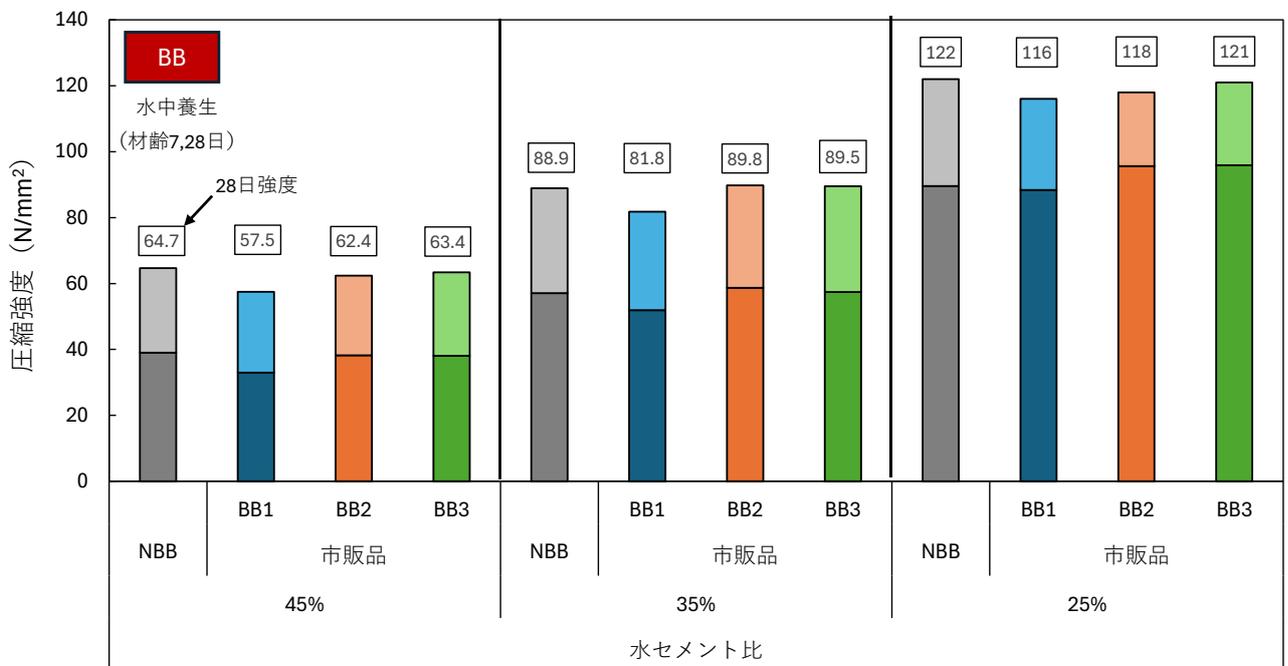


図-3.2 圧縮強度 (BB-水中養生、材齢 7 日および 28 日) の結果

(2)簡易断熱養生

簡易断熱養生時のコンクリートの圧縮強度試験結果を図-3.3 および図-3.4 に示す。NN を使用したコンクリートの簡易断熱養生時の圧縮強度は、いずれの水セメント比においても N1、N2、N3 と同等であった。

また、水中養生の材齢 28 日の圧縮強度に対する、簡易断熱養生の材齢 91 日の圧縮強度の差分として定義される構造体強度補正值 ($_{28}S'_{91}$) を図-3.5 および図-3.6 に示す。また、簡易断熱養生の材齢 91 日の圧縮強度と構造体強度補正值 ($_{28}S'_{91}$) の関係を図-3.7 および図-3.8 に示す。さらに図-3.9 には、N1,N2,N3 を使用したコンクリートの構造体強度補正值 ($_{28}S'_{91}$) NN を使用したコンクリートの構造体強度補正值 ($_{28}S'_{91}$) の関係を、セメントの種類ごとに示した。これらより、NN を使用したコンクリートの構造体強度補正值は、いずれの水セメント比においても N1、N2、N3 と大きな差異はなかった。

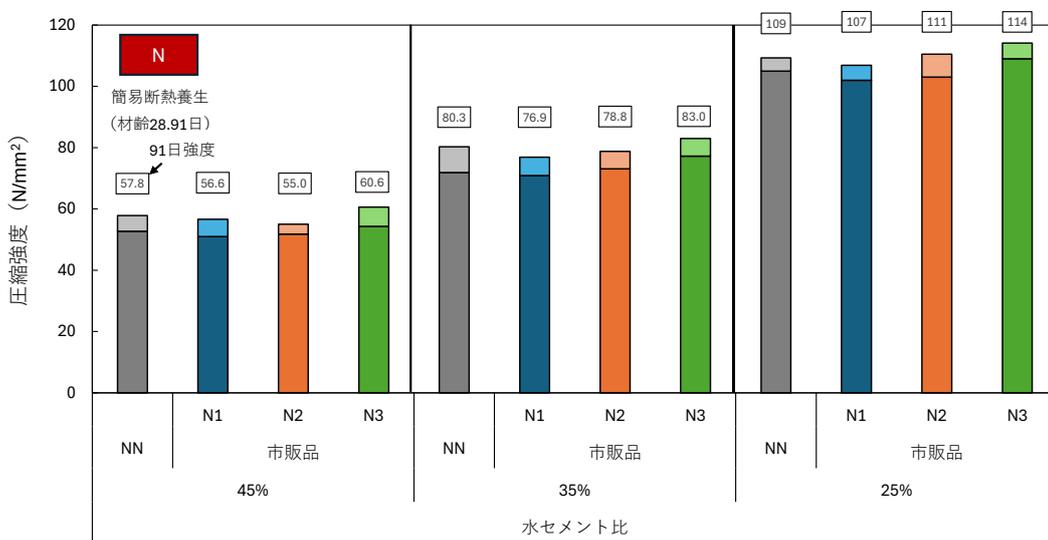


図-3.3 圧縮強度 (N-簡易断熱養生、材齢 28 日および 91 日) の結果

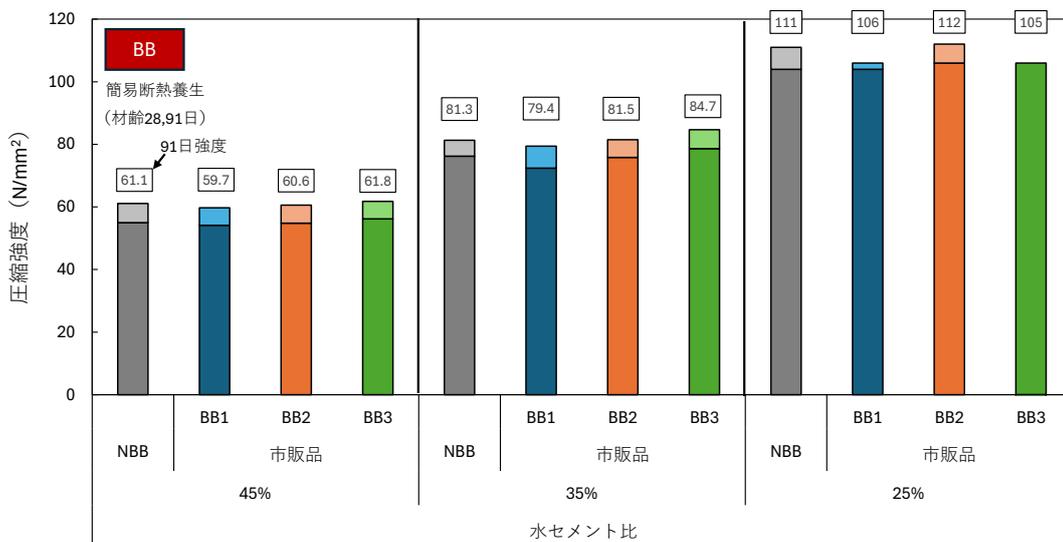


図-3.4 圧縮強度 (BB-簡易断熱養生、材齢 28 日および 91 日) の結果

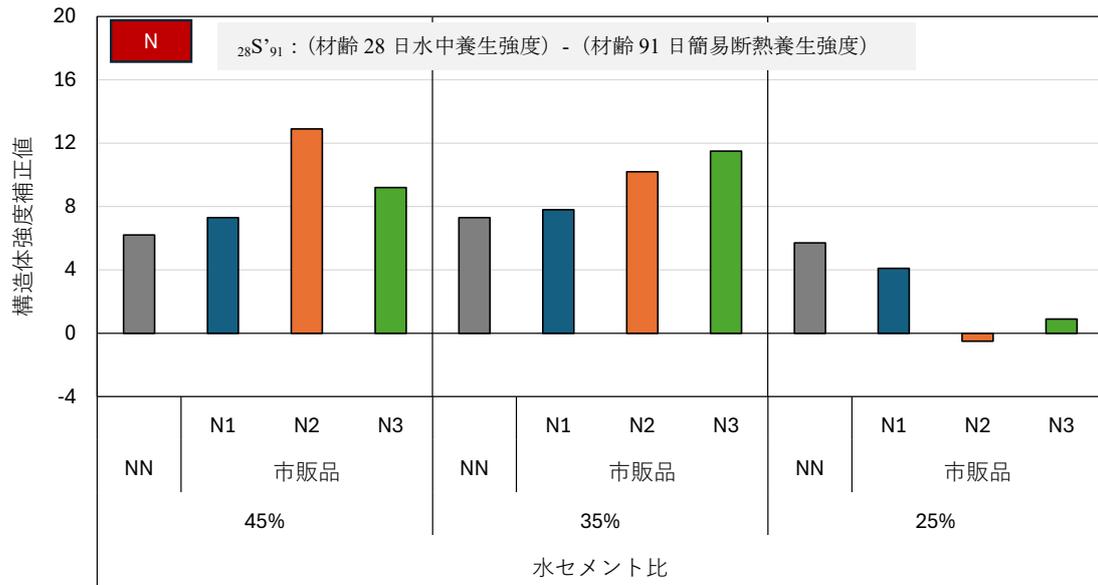


図-3.5 構造体強度補正值 $_{28}S'_{91}$ (N) の結果

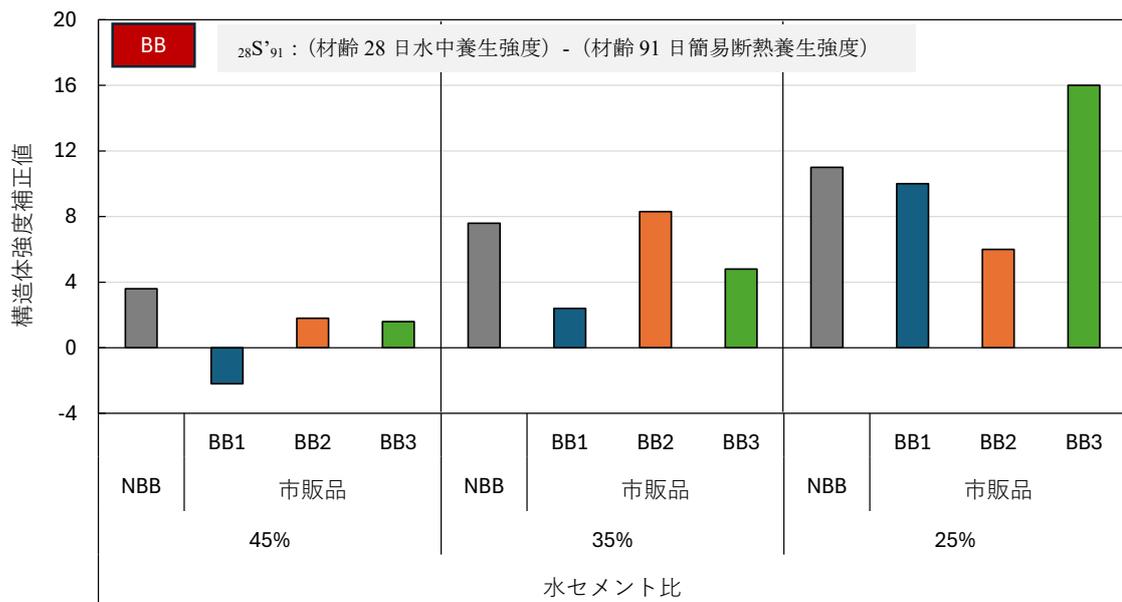


図-3.6 構造体強度補正值 $_{28}S'_{91}$ (BB) の結果

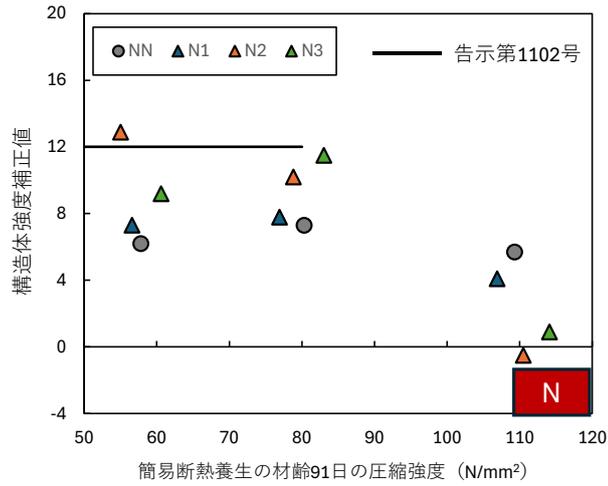


図-3.7 簡易断熱養生材齢91日の圧縮強度と構造体強度補正值 $_{28}S'_{91}$ の関係 (N)

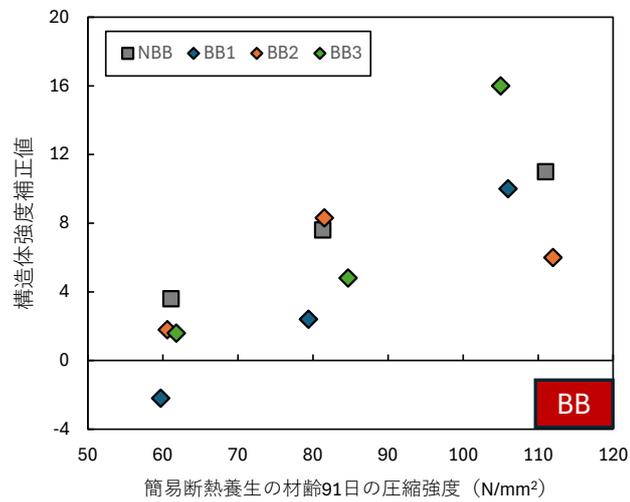
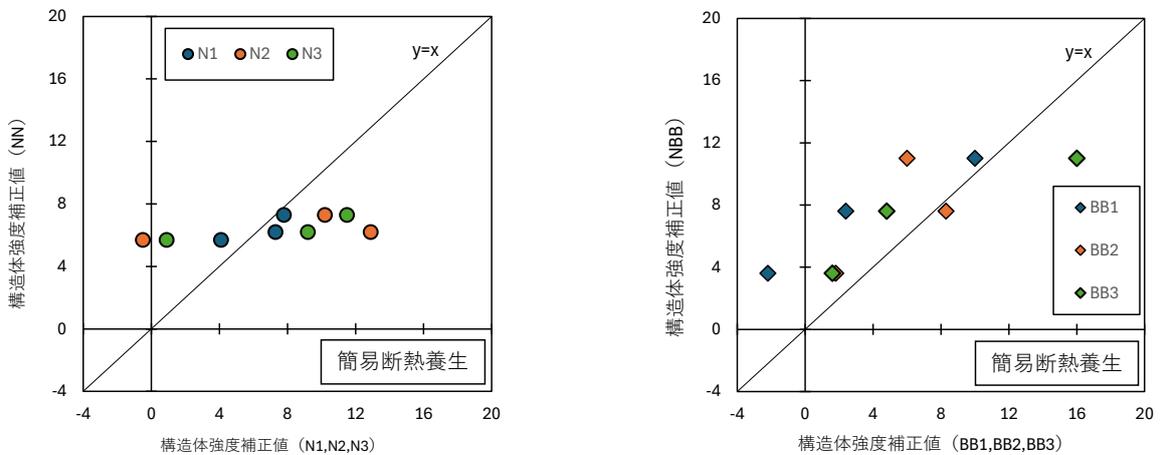


図-3.8 簡易断熱養生材齢91日の圧縮強度と構造体強度補正值 $_{28}S'_{91}$ の関係 (BB)



(1) NN と N1, N2, N3 の関係

(2) NBB と BB1, BB2, BB3 の関係

図-3.9 N と NN および BB と NBB の構造体強度補正值 $_{28}S'_{91}$ の関係

(3)スラブ模擬養生

スラブ模擬養生時のコンクリートの圧縮強度試験結果を図-3.10に示す。NNを使用したコンクリートのスラブ模擬養生時の圧縮強度は、いずれの水セメント比においてもN1、N2、N3と同等であった。

また、水中養生の材齢28日の圧縮強度に対する、スラブ模擬養生の材齢91日の圧縮強度の差分（以下、構造体強度補正值 $({}_{28}S''_{91})$ ）を図-3.11に、スラブ模擬養生の材齢91日の圧縮強度と構造体強度補正值 $({}_{28}S''_{91})$ の関係を図-3.12に、N1、N2、N3を使用したコンクリートの構造体強度補正值 $({}_{28}S''_{91})$ とNNを使用したコンクリートの構造体強度補正值 $({}_{28}S''_{91})$ の関係を図-3.13にそれぞれ示す。NNを使用したコンクリートの構造体強度補正值は、いずれの水セメント比においてもN1、N2、N3と大きな差異はなかった。

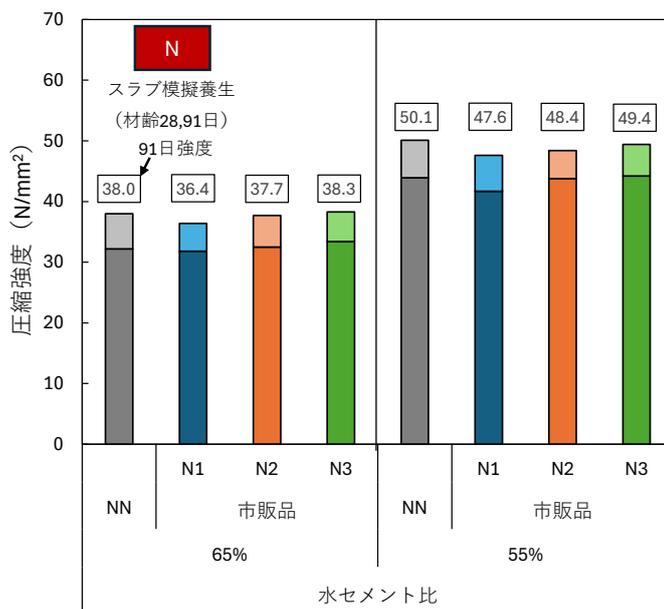


図-3.10 圧縮強度 (N-スラブ模擬養生、材齢28日および91日) の結果

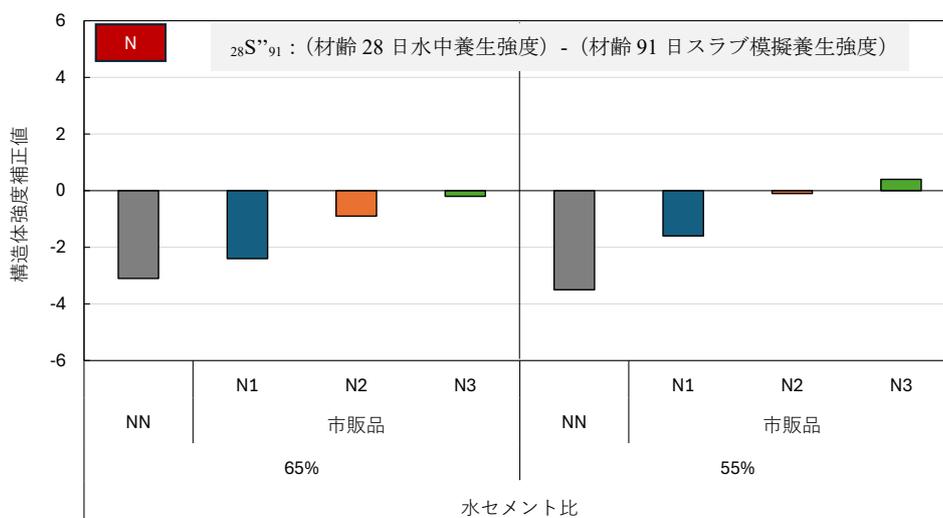


図-3.11 構造体強度補正值 ${}_{28}S''_{91}$ (N) の結果

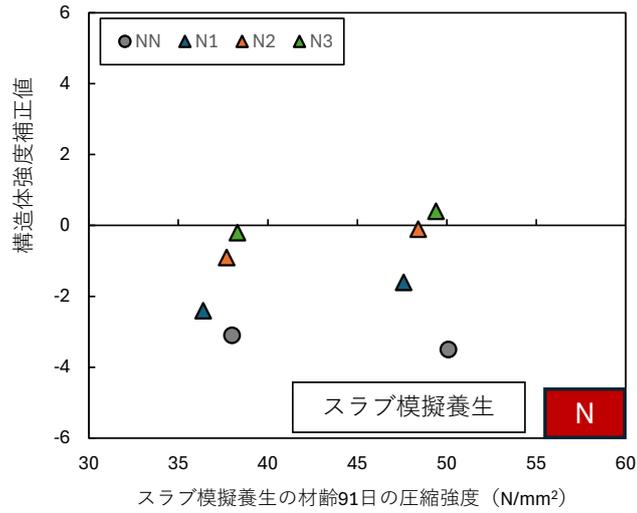


図-3.12 スラブ模擬養生材齢91日の圧縮強度と構造体強度補正值 $_{28}S''_{91}$ の関係 (N)

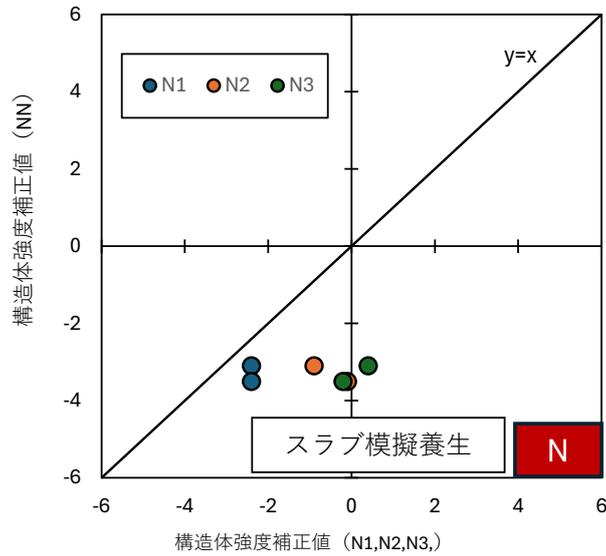


図-3.13 N と NN の構造体強度補正值 $_{28}S''_{91}$ の関係

3.2 高温環境下のコンクリートのフレッシュ性状確認試験

3.2.1 調合およびコンクリートのフレッシュ性状

コンクリートの調合およびフレッシュ性状を表-3.2 に示す。NN を使用したコンクリートの所定のスランプを得るために必要な混和剤量は、いずれの環境温度においても N1 と同等であった。

表-3.2 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

セメント	環境温度 (°C)	水セメント比 (%)	単位粗骨材かさ容積 (m³/m³)	単位量 (kg/m³) ※				高性能 AE 減水剤 使用量 (セメント×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
				水	セメント	細骨材	粗骨材				
NN	20	35	0.54	175	500	814	881	0.95	22.5	1.6	22
N1								0.95	22.0	2.2	22
NN	40	35	0.54	175	500	814	881	1.05	22.5	1.0	39
N1								1.05	23.5	0.7	39

※：いずれのセメントも N:3.16g/cm³、BB:3.04g/cm³ として調合計算を実施したため、厳密には 1m³ ではない。

3.2.2 スランプおよびスランプロス試験

コンクリートのスランプ試験結果を図-3.14 に示す。NN を使用したコンクリートの 60 分経過後のスランプの低下量は、いずれの環境温度においても N1 と同等であった。特に、20°C 環境における NN のスランプの低下量は 0.5cm であり、これは前述した日本建築学会「暑中コンクリートの施工指針・同解説 (2019 年 7 月改定)」に記載されている『20°C 環境下でのスランプの経時変化において、静置状態で 60 分経過後のスランプの低下量が 6cm 以下であること。』を満足しており、改正 JIS セメントを使用したコンクリートにおいても現行の基準が適用できると考えられる。

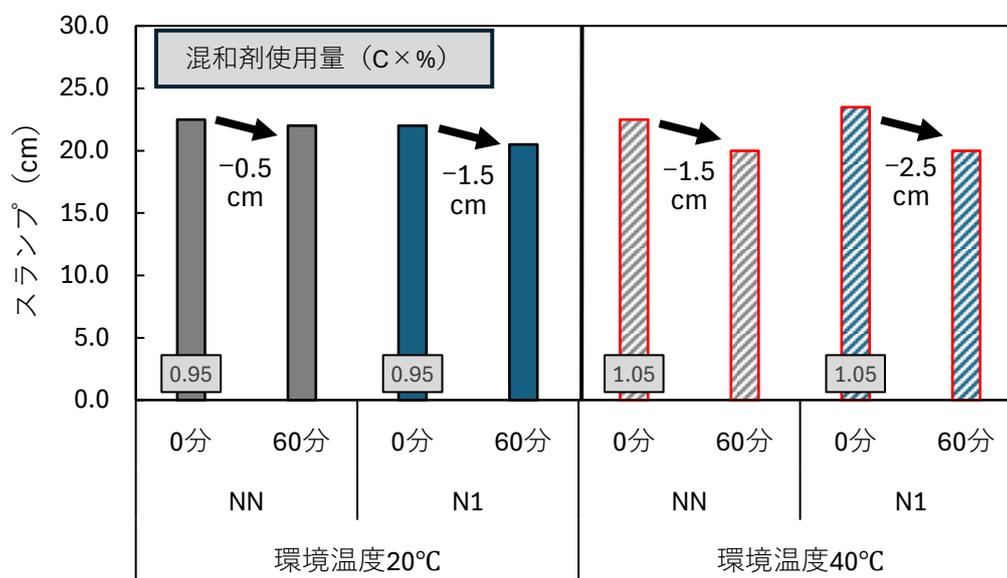


図-3.14 スランプおよびスランプロス試験結果

3.2.3 凝結試験

コンクリートの凝結試験結果を図-3.15に示す。NNを使用したコンクリートの貫入抵抗値が $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ に到達するまでの時間は、 20°C 環境および暑中期を想定した 40°C 環境においてもN1と同等であった。また、 20°C 環境においてNNを使用したコンクリートの貫入抵抗値が $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ に到達するまでの時間は7時間40分であり、これは前述した日本建築学会「暑中コンクリートの施工指針・同解説（2019年7月改定）」に記載されている『 20°C 環境下での凝結試験において、貫入抵抗値が $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ に達した時間が5時間23分以上（補正式 $T_{38}=0.65 \times T_{20}$ 、 T_{38} :3.5時間以上、T:凝結時間で添字は温度）であること。』を満足しており、改正JISセメントを使用したコンクリートにおいても現行の基準が適用できると考えられる。今回の試験結果を図-2.3に加筆したものを図-3.16に示す。

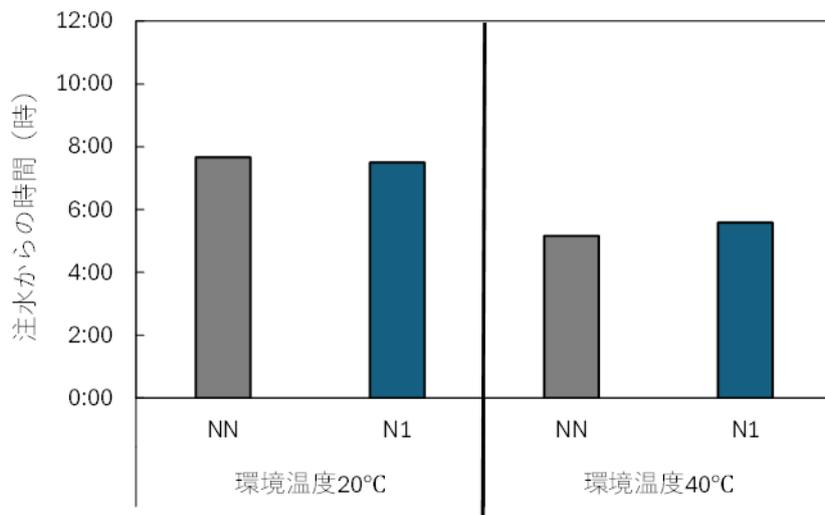


図-3.15 貫入抵抗値 $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ に到達するまでの時間

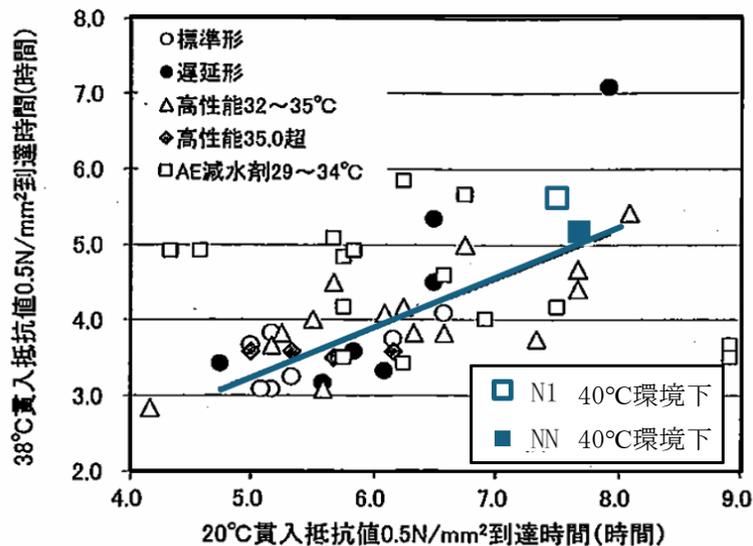


図-3.16 20°C 環境下と 38°C 環境下の貫入抵抗値 $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ 到達時間の関係 (NN, N1 追記)¹を元に加筆・修正)

1) 日本建築学会；暑中コンクリートの施工指針・同解、p.80、2019.7

3.3 高温履歴下のモルタル・セメントペースト試験

3.3.1 フレッシュ性状

モルタルのフレッシュ性状試験結果を表-3.3 に示す。NN を使用したモルタルの所定のフローを得るために必要な SP 量は、環境温度に関わらず概ね N1 と同等であった。

表-3.3 モルタルのフレッシュ性状

環境温度 (°C)	養生条件	セメント	調合条件		混和剤添加率 (C×%)		フレッシュ性状		
			水セメント比 (%)	セメント砂比	SP	DF	フロー (mm)	練上がり 温度(°C)	空気量 (%)
20	20°C 水中	NN	35	2.0	1.10	0.10	233	23.1	1.9
		N1	35	2.0	1.30	0.20	223	23.8	1.8
38	90°C 高温履歴	NN	35	2.0	1.15	0.10	209	41.1	2.2
		N1	35	2.0	1.20	0.20	204	40.7	2.1

3.3.2 モルタルの圧縮強度

材齢 28 日におけるモルタルの圧縮強度試験結果を図-3.17 に示す。モルタルの圧縮強度は初期に高温履歴を受けることで低下するものの、それぞれの温度条件において NN を使用した場合は N1 を使用した場合と同等であった。

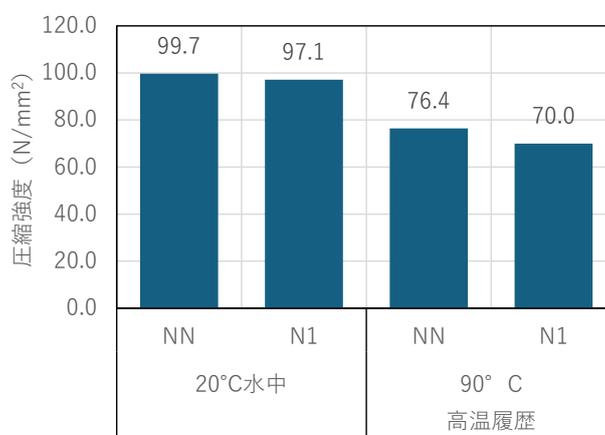


図-3.17 モルタルの圧縮強度

3.3.3 モルタルの細孔構造

材齢 28 日におけるモルタルの細孔構造として、細孔容積と細孔直径の関係を図-3.18 に、積算細孔容積と細孔直径の関係を図-3.19 に示す。高温履歴を受けたモルタルは 20℃環境で養生した場合と比較して、直径が 0.02~0.04μm 程度の空隙量が少なく、0.04~0.10μm 程度の空隙量が多くなり、総細孔量は多くなった。しかし、NN を使用した場合の細孔径分布および総細孔量は、N1 使用時と同等であった。

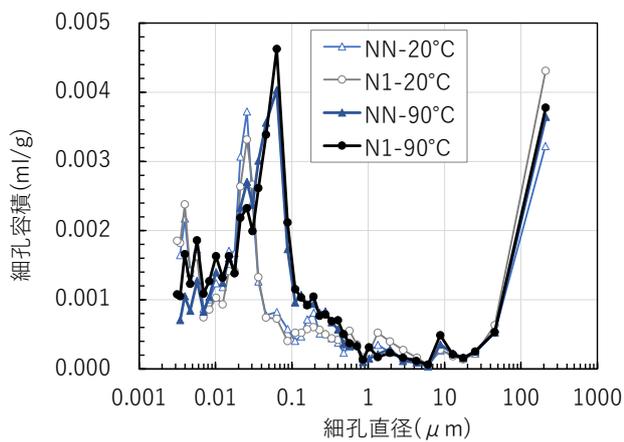


図-3.18 モルタルの細孔径分布

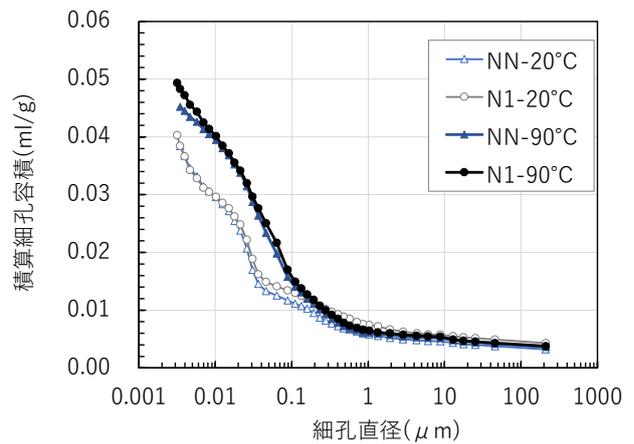


図-3.19 モルタルの積算細孔容積

3.3.4 走査型電子顕微鏡による硬化体組織の観察

材齢 28 日における各養生条件の二次電子像を表-3.4 および表-3.5 に示す。20℃水中養生を行った場合は、NN および N1 とともに密実な組織が形成されており、差は認められなかった。90℃温度履歴を受けた場合は、NN および N1 とともに、密実な組織が形成されている領域 (①) と、骨材や気泡の周囲等にやや疎な領域 (②) が確認された。密実な領域では、20℃水中養生を行った場合と同様に、NN と N1 の組織に差は認められなかった。一方、やや疎な領域では、N1 は NN と比較して、より疎であった。

表-3.4 20℃水中養生を行った試料の二次電子像

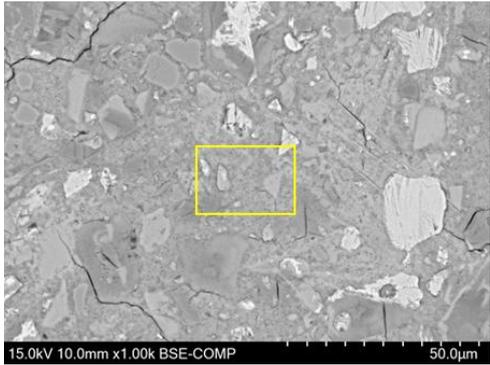
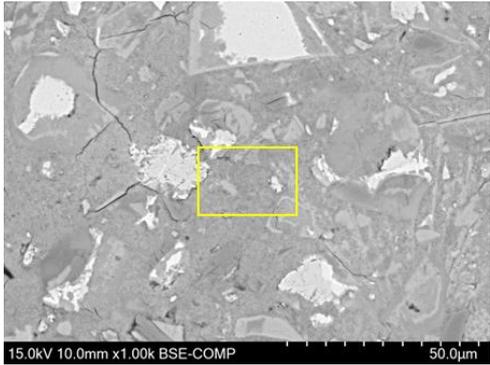
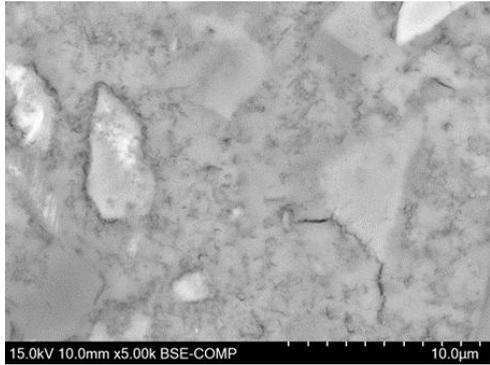
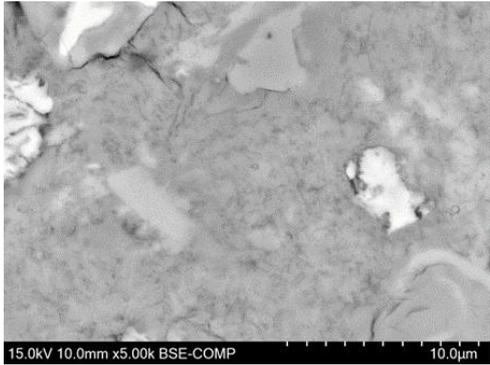
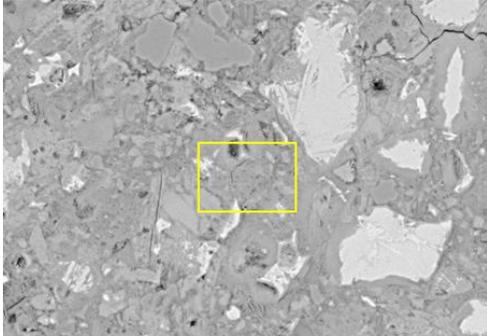
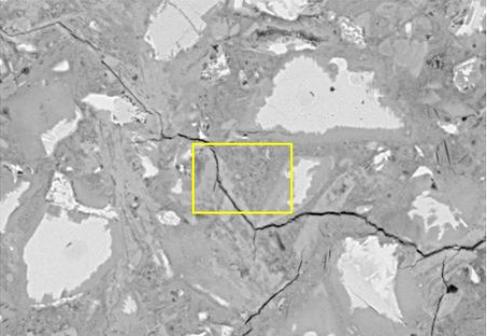
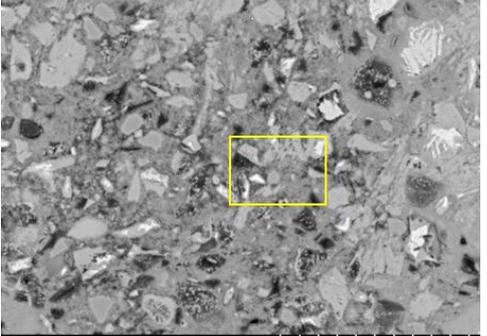
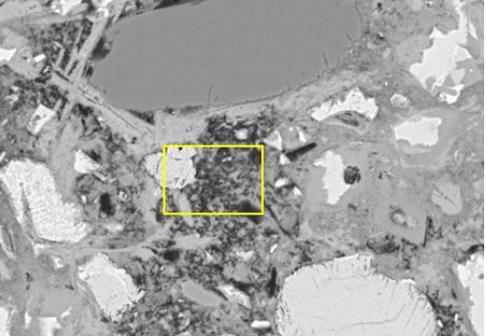
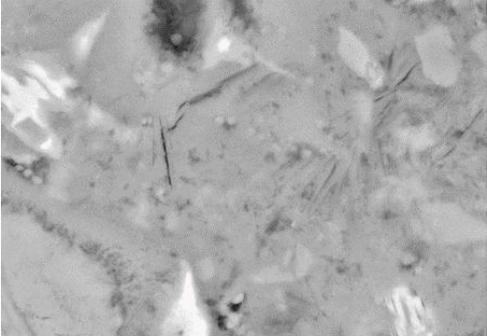
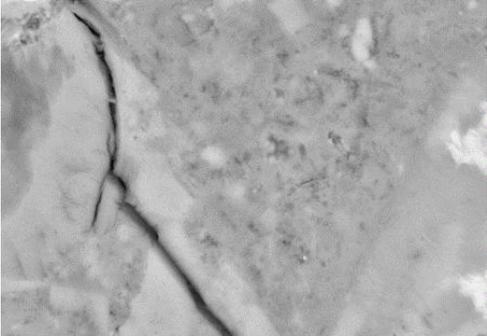
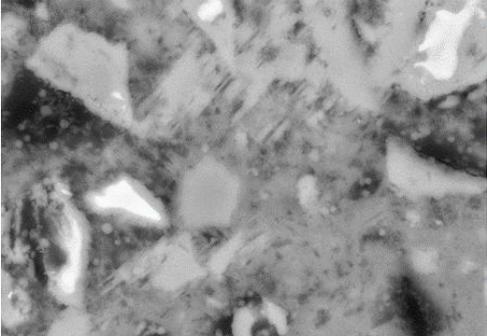
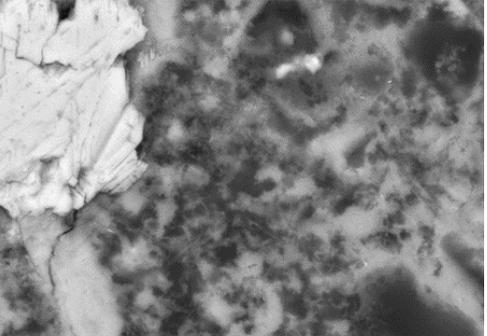
養生	倍率	NN	N1
20℃ 水中	×1k		
	×5k		

表-3.5 90℃高温履歴を受けた試料の二次電子像

養生	倍率	NN	N1
90℃ 高温履歴	×1k	<p>①</p>  <p>15.0kV 10.0mm x1.00k BSE-COMP 50.0μm</p>	 <p>15.0kV 10.0mm x1.00k BSE-COMP 50.0μm</p>
		<p>②</p>  <p>15.0kV 10.0mm x1.00k BSE-COMP 50.0μm</p>	 <p>15.0kV 10.0mm x1.00k BSE-COMP 50.0μm</p>
	×5k	<p>①</p>  <p>15.0kV 10.0mm x5.00k BSE-COMP 10.0μm</p>	 <p>15.0kV 10.0mm x5.00k BSE-COMP 10.0μm</p>
		<p>②</p>  <p>15.0kV 10.0mm x5.00k BSE-COMP 10.0μm</p>	 <p>15.0kV 10.0mm x5.00k BSE-COMP 10.0μm</p>

3.3.5 TG-DTAによる水酸化カルシウム量

材齢 7,28 日における TG-DTA による測定結果を表-3.6 に、水酸化カルシウムの含有率を図-3.20 に示す。表には質量減少率より算出した水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの含有率を示す。NN を使用した場合は、セメント中に含まれる石灰石微粉末量が増加したことによって、材齢および養生条件に関わらず、N1 の場合よりも炭酸カルシウム含有量が多くなった。水酸化カルシウムの含有率は、材齢による差は小さいものの、NN および N1 とともに高温履歴を受けた場合の方が 20°C で養生した場合よりも大きく、いずれの場合も NN は N1 と同程度であることが確認された。

表-3.6 TG-DTA による測定結果

材齢	養生	試料名	質量減少率(%)			含有率(%)	
			結合水※ (~1000°C)	H ₂ O	CO ₂	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
7 日	20°C 水中	NN	18.04	3.42	3.25	14.06	7.39
		N1	16.79	3.35	0.93	13.78	2.12
	90°C 高温履歴	NN	17.77	4.22	3.33	17.35	7.57
		N1	15.65	4.05	1.25	16.65	2.84
28 日	20°C 水中	NN	18.71	3.22	2.97	13.24	6.75
		N1	16.96	3.18	0.72	13.08	1.64
	90°C 高温履歴	NN	18.17	3.92	3.23	16.12	7.35
		N1	15.99	3.80	1.09	15.63	2.48

※室温~1000°Cにおける強熱減量

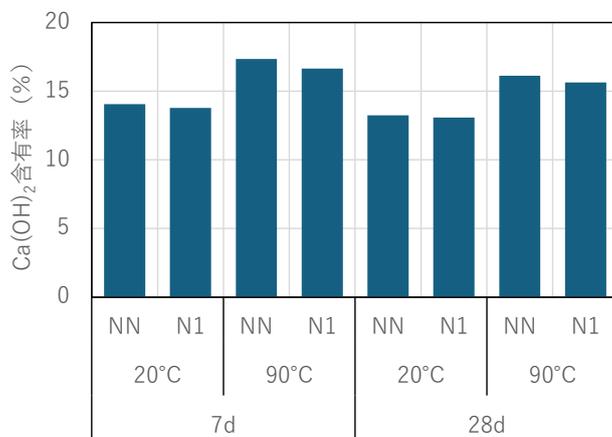


図-3.20 Ca(OH)₂ 含有率

3.3.6 粉末X線回折（リートベルト解析）による C_3S および C_2S の反応率および非晶質量

材齢 28,91 日における C_3S および C_2S の反応率およびセメントペースト中の非晶質量を表-3.7に示す。NN の材齢 28 日における C_3S および C_2S の反応率を N1 と比較すると、養生条件に関わらず C_3S は高く、 C_2S は低い結果となった。材齢 91 日における C_3S および C_2S の反応率は、材齢 28 日と同様に NN が N1 よりも C_3S の反応率は高く、 C_2S の反応率は低い結果であった。しかし、材齢 28 日以降における NN の C_2S 反応率の増加量が大きかったため、NN と N1 の C_2S 反応率の差は縮小した。

C_2S に関しては、高い精度で定量することが困難であり、ばらつきが大きいとされている^{3,4)}が、浅賀らの研究⁵⁾では、環境温度 20°C で養生した普通セメント中の C_2S の反応率は材齢 28 日が 20%程度、材齢 91 日が 40%程度とされており、本検討における NN の C_2S 反応率と同等であった。また、浅賀らは、50°C および 80°C で養生した場合の C_2S 反応率を測定しており、材齢 28 日ではそれぞれ 50% および 64%、材齢 91 日では 67% および 74% であったことを報告している⁵⁾。本検討において高温履歴養生を行った場合の、材齢 28 日までの平均養生温度は約 30°C、材齢 91 日では約 23°C であった。このことを踏まえると、高温履歴を受けた NN の C_2S 反応率は十分に高いと考えられる。

以上より、NN における C_3S および C_2S の反応率は、養生条件によらず十分高く、特に高温履歴を受けることで、材齢 28 日および 91 日ともにカルシウムシリケート相の反応が促進されることを確認した。また、養生温度によらず、非晶質量は NN と N1 で概ね同等であることから、C-S-H 生成量は同等と考えられる。細孔構造、SEM 画像、熱分析の結果も踏まえると、NN の C-S-H 生成量は、養生条件によらず従来の OPC と同等であり、緻密な組織を形成していると言える。

表-3.7 C_3S および C_2S の反応率および非晶質量

養生方法	セメント	反応率 (%)						非晶質 (%)	
		28d			91d			28d	91d
		C_3S	C_2S	カルシウムシリケート	C_3S	C_2S	カルシウムシリケート		
20°C 水中	NN	85.8	18.6	67.8	90.3	39.8	76.8	51.1	58.2
	N1	76.3	40.9	66.7	82.6	52.4	74.5	54.4	60.4
高温履歴 (最高温度 90°C)	NN	89.4	45.7	77.7	91.7	58.5	82.8	53.5	61.1
	N1	78.7	63.1	74.5	83.2	61.2	77.2	55.0	59.4

3) 松下哲郎、平尾宙、丸山一平、野口貴文：リートベルト解析によるセメントの水和反応の定量解析、日本建築学会構造系論文集、第 73 巻、第 623 号、1-8、2008.1

4) 日本コンクリート工学協会：反応モデル解析研究委員会報告（I）セメントコンクリートの反応モデル解析の現状と今後の展望、pp.43-47、1996

5) K.Asaga, M.Ishizaki, S.Takahashi, K.Konishi, T.Tsurumi, M.Daimon : Effect of Curing Temperature on the Hydration of Portland Cement Compound, 9th, Proc. of the Int.Cong. on the Chem. Cem., Vol.4, pp.181-187, 1992