

技術資料



住友大阪セメント株式会社

－ 目次 －

1. はじめに.....	3
2. セメントの特徴.....	4
3. 試験項目および試験方法.....	6
4. フレッシュコンクリートの性状.....	7
4.1 単位水量とスランプの関係.....	7
4.2 ブリーディング	8
4.3 凝結時間	9
5. 硬化コンクリートの性状.....	10
5.1 強度試験結果	10
5.2 セメント水比と圧縮強度の関係	14
5.3 圧縮強度発現式	19
5.4 積算温度と圧縮強度の関係.....	29
5.5 圧縮強度と割裂引張強度の関係	32
5.6 圧縮強度とヤング係数の関係	33
5.7 圧縮強度と曲げ強度の関係.....	34
6. 断熱温度上昇特性	35
6.1 断熱温度上昇試験結果の一例	35
6.2 断熱温度上昇曲線.....	36
7. 収縮特性.....	40
7.1 乾燥収縮	40
7.2 自己収縮	42
8. 耐久性	44
8.1 凍結融解抵抗性	44
8.2 中性化.....	45
8.3 塩分浸透性.....	48
9. 高強度コンクリートの物性	49
9.1 水セメント比と高性能 AE 減水剤添加量の関係.....	49
9.2 強度試験結果の一例	50
9.3 セメント水比と圧縮強度の関係	51
9.4 圧縮強度と割裂引張強度およびヤング係数との関係	52

9.5 断熱温度上昇特性.....	54
10. コンクリートの主要物性一覧.....	55

[参考資料]

1. 各種セメントを使用した膨張コンクリートの特性.....	1
1.1 標準使用量での一軸拘束膨張率.....	1
1.2 単位膨張材量と一軸拘束膨張率の関係.....	2
1.3 単位膨張材量ごとの圧縮強度の変化.....	3
2. 高炉スラグ微粉末やフライアッシュを使用したコンクリートの断熱温度上昇特性....	4

1. はじめに

コンクリートは国土保全・強靱化や国土開発を支える基礎資材の一つと言えます。コンクリートは、水、セメント、骨材、混和剤等から構成されるため、その品質確保、向上においては、材料や配合を適切に選定しなければなりません。コンクリート中に占めるセメントの割合は10～30質量%と骨材が占める割合に比べれば少ないですが、コンクリート品質の良否を左右する重要な役割を担っていると言っても過言ではありません。そのため、セメント生産者としては、セメント種類や配合に応じたコンクリートの物性についてデータを蓄積すると共に、それらをセメントユーザーへ情報提供しなければなりません。その一助を担うのがセメントの技術資料です。

弊社では、市販の普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、高炉セメントを対象にコンクリートの物性データを取り纏めた総合技術資料を整備、提供して参りました。今回、夏季の気温上昇につれてコンクリート温度も35℃に近付く状況もあるなか、コンクリートの練上がり、養生温度が35℃となるケースの物性データを蓄積し、技術資料を改訂しました。

第2版となる本書も第1版と同様に、各種セメントを使用したコンクリートの品質が容易に比較できる構成となっています。つきましては、要求性能に応じたセメント選定、配合設計等にお役立て下さい。

2. セメントの特徴

本書に示す普通ポルトランドセメント，早強ポルトランドセメント，中庸熱ポルトランドセメント，低熱ポルトランドセメント，高炉セメント B 種の特徴は表 2-1 に示す通りです．また，物理的性質や化学成分は表 2-2 の通りです．

表 2-1 セメントの特徴

種類	記号	特徴
普通ポルトランドセメント	N	一般の土木建築工事やセメント製品用など，さまざまな用途に最も多く使用されているセメント
早強ポルトランドセメント	H	N と比べて，鉱物組成のケイ酸三カルシウムを多くし，比表面積を高めた初期強度の大きいセメントであり，寒冷期や緊急の工事，プレストレストコンクリート，コンクリート製品に広く利用
中庸熱ポルトランドセメント	M	N に比べて，水和熱が小さく，長期強度の発現に優れ，ダム等のマスコンクリートに使用されているほか，建築構造物や舗装用に適したセメント
低熱ポルトランドセメント	L	ケイ酸二カルシウムの含有量が 55%程度で，水和熱が M の 80%程度となり，温度ひび割れの抑制に効果を発揮
高炉セメント B 種	BB	高炉スラグ微粉末を混合材として使用したセメントであり，化学抵抗性に優れ，河川，港湾といった土木工事に広く利用

表 2-2 物理的性質および化学成分

種類 項目		N		H		M		L		BB	
		JIS 規格	代表値	JIS 規格	代表値	JIS 規格	代表値	JIS 規格	代表値	JIS 規格	代表値
密度(g/cm ³)		---	3.15	---	3.13	---	3.21	---	3.24	---	3.04
比表面積(cm ² /g)		2500 以上	3350	3300 以上	4600	2500 以上	3300	2500 以上	3800	3000 以上	3870
凝結	水量(%)	---	27.5	---	30.0	---	27.0	---	27.0	---	29.0
	始発(h-m)	60 分 以上	2-20	45 分 以上	1-50	60 分 以上	2-40	60 分 以上	3-20	60 分 以上	2-50
	終結(h-m)	10 時間 以下	3-30	10 時間 以下	2-50	10 時間 以下	4-20	10 時間 以下	5-10	10 時間 以下	4-30
安定性		良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
圧縮強さ (N/mm ²)	1 日	---	---	10.0 以上	29.0	---	---	---	---	---	---
	3 日	12.5 以上	31.0	20.0 以上	48.0	7.5 以上	20.0	---	---	10.0 以上	22.0
	7 日	22.5 以上	47.0	32.5 以上	58.0	15.0 以上	30.0	7.5 以上	20.0	17.5 以上	36.0
	28 日	42.5 以上	62.0	47.5 以上	69.0	32.5 以上	59.0	22.5 以上	57.0	42.5 以上	62.0
	91.日	---	---	---	---	---	---	42.5 以上	80.0	---	---
水和熱 (J/g)	7 日	---	---	---	---	290 以下	275	250 以下	215	---	---
	28 日	---	---	---	---	340 以下	325	290 以下	270	---	---
酸化マグネシウム (%)		5.0 以下	1.30	5.0 以下	1.20	5.0 以下	0.70	5.0 以下	0.70	6.0 以下	3.40
三酸化硫黄 (%)		3.5 以下	2.00	3.5 以下	3.00	3.0 以下	1.80	3.5 以下	2.40	4.0 以下	1.80
強熱減量 (%)		5.0 以下	2.30	5.0 以下	1.40	3.0 以下	0.70	3.0 以下	0.60	5.0 以下	1.70
全アルカリ (%)		0.75 以下	0.56	0.75 以下	0.49	0.75 以下	0.47	0.75 以下	0.48	---	---
塩化物イオン (%)		0.035 以下	0.020	0.02 以下	0.012	0.02 以下	0.007	0.02 以下	0.005	---	---
ケイ酸三カルシウム (%)		---	---	---	---	50 以下	43	---	---	---	---
ケイ酸二カルシウム (%)		---	---	---	---	---	---	40 以上	55	---	---
アルミン酸三カルシウム (%)		---	---	---	---	8 以下	4	6 以下	2	---	---

3. 試験項目および試験方法

本書に掲載する試験項目およびその試験方法は表 3-1 に示す通りです。

表 3-1 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101 コンクリートのスランプ試験方法
空気量	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
ブリーディング	JIS A 1123 コンクリートのブリーディング試験方法
凝結時間	JIS A 1147 コンクリートの凝結時間試験方法
圧縮強度	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法
引張強度	JIS A 1113 コンクリートの割裂引張強度試験方法
ヤング係数	JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法
断熱温度上昇	日本コンクリート工学協会 品質評価試験方法研究委員会報告書「コン クリートの断熱温度上昇試験方法(案)」
促進中性化	JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法
凍結融解抵抗性	JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法
塩分浸透	JIS A 1171 ポリマーセメントモルタルの試験方法
乾燥収縮	JIS A 1129 モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法
自己収縮	日本コンクリート工学協会 コンクリートの自己収縮研究委員会「モー ルドゲージ法(簡易法)」

4. フレッシュコンクリートの性状

4.1 単位水量とスランプの関係

環境温度 20℃における単位水量とスランプの関係を図 4.1-1 および表 4.1-1 に示します。単位水量が 160～180kg/m³では、単位水量とスランプの関係は何れのセメントについても直線関係にあります。

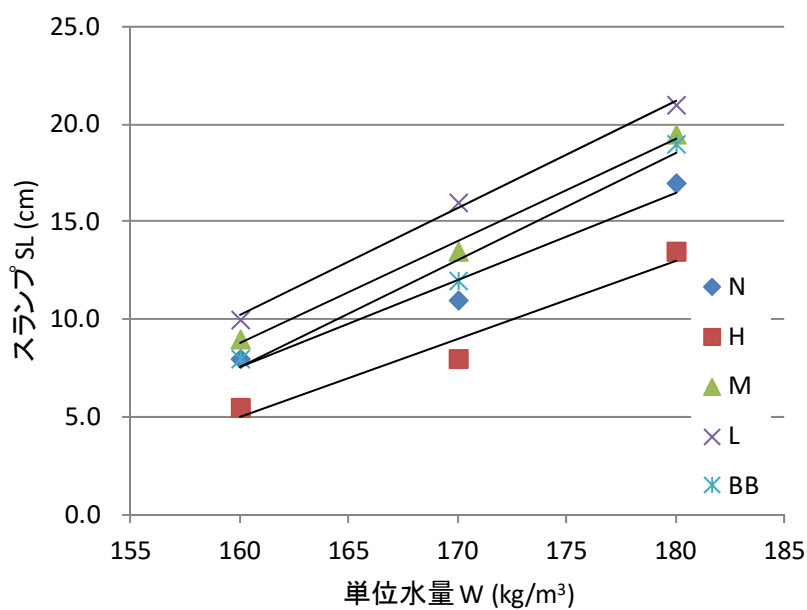


図 4.1-1 単位水量とスランプの関係

表 4.1-1 単位水量とスランプの関係

種類	SL=a・W+b	
	a	b
N	0.450	-64.5
H	0.400	-59.0
M	0.525	-75.2
L	0.550	-77.8
BB	0.550	-80.5

4.2 ブリーディング

水セメント比 50%, 単位水量 170kg/m³におけるブリーディング試験結果を表 4.2-1 および図 4.2-1 に示します。なお、この試験は環境温度 5, 20, 30, 35℃において実施しました。

表 4.2-1 ブリーディング試験結果

種類	W/C (%)	環境温度 (℃)	ブリーディング率 (%)	ブリーディング継続時間 (分)
N	50	5	2.44	480
		20	2.16	300
		30	2.07	210
		35	2.04	150
H		5	1.25	450
		20	1.06	240
		30	0.95	180
		35	0.92	180
M		5	3.22	570
		20	2.65	300
		30	2.27	210
		35	2.08	210
L		5	4.17	600
		20	3.33	390
		30	2.85	240
		35	2.56	180
BB		5	2.47	510
		20	2.25	300
		30	2.06	210
		35	1.99	180

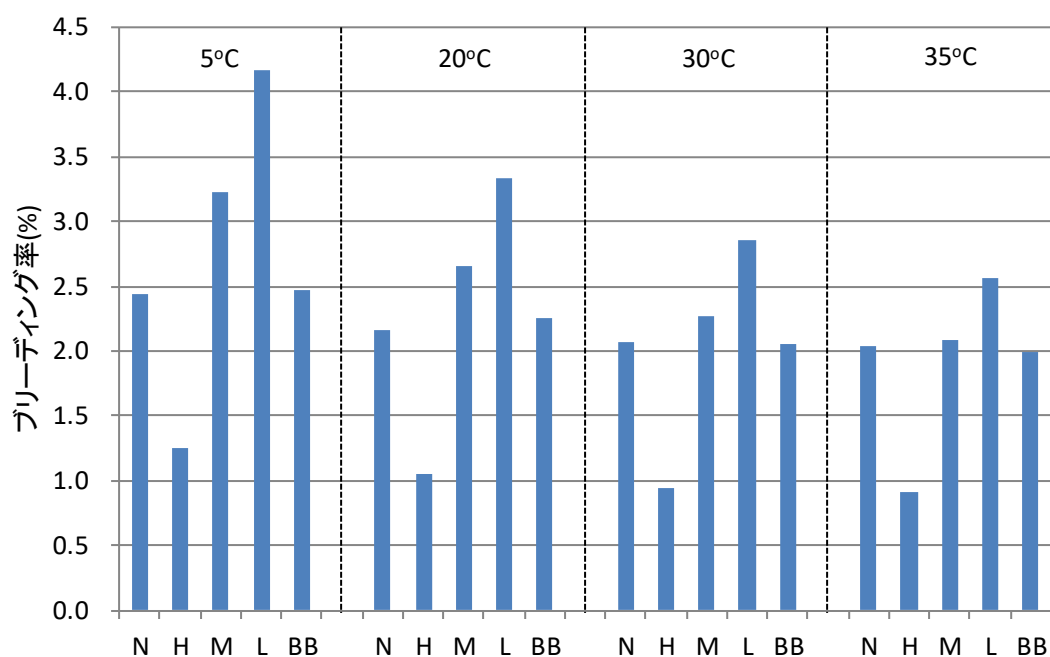


図 4.2-1 ブリーディング試験結果

4.3 凝結時間

ブリーディング試験と同一条件で実施した凝結試験の結果を表 4.3-1 および図 4.3-1 に示します。

表 4.3-1 凝結試験結果

種類	W/C (%)	環境温度 (℃)	始発時間 (h-m)	終結時間 (h-m)
N	50	5	13-40	18-50
		20	5-40	7-30
		30	4-20	5-40
		35	3-55	5-10
H		5	10-20	14-20
		20	4-00	5-30
		30	3-20	4-20
		35	2-55	3-50
M		5	15-00	20-40
		20	5-40	7-20
		30	4-30	5-55
		35	4-00	5-10
L		5	17-10	22-20
		20	6-00	8-10
		30	5-20	6-50
		35	4-30	6-00
BB		5	15-20	21-00
		20	5-50	8-00
		30	4-25	6-20
		35	4-00	5-30

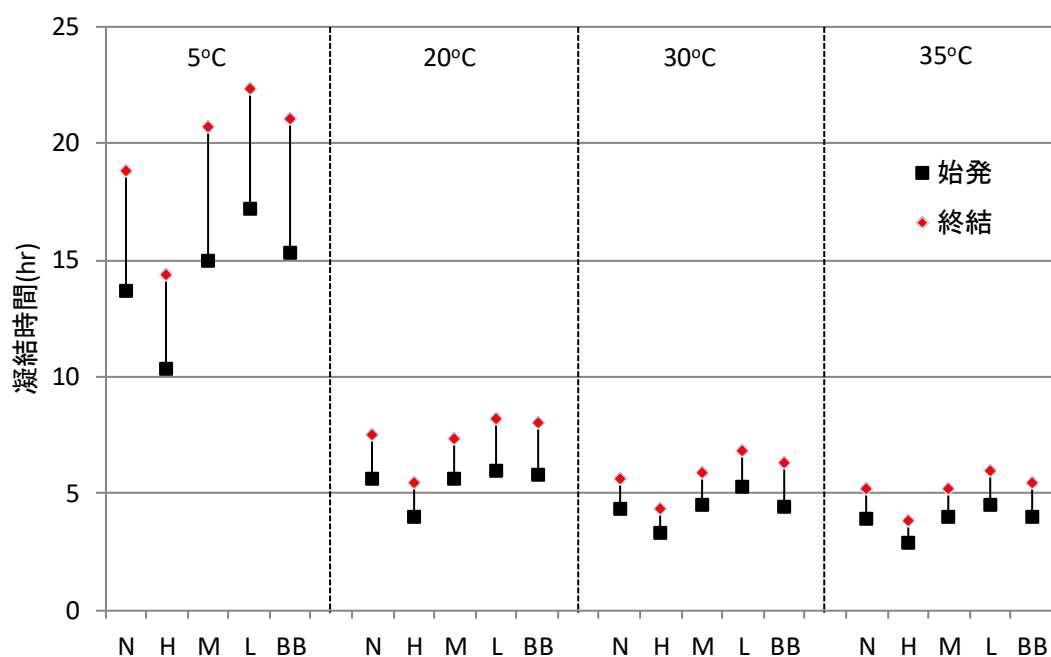


図 4.3-1 凝結試験結果

5. 硬化コンクリートの性状

5.1 強度試験結果

圧縮強度を表 5.1-1, 割裂引張強度を表 5.1-2, ヤング係数を表 5.1-3, 曲げ強度を表 5.1-4 に示します.

表 5.1-1 圧縮強度試験結果

セメント種類	練上がり 温度 (°C)	養生温度 (°C)	W/C (%)	圧縮強度(N/mm ²)					
				1 日	3 日	7 日	28 日	56 日	91 日
N	5	5	40	1.35	16.2	39.3	57.0	64.8	69.5
			50	1.14	9.46	28.3	44.3	51.8	54.7
			60	0.99	6.14	19.1	32.2	38.4	41.4
	5	20	40	1.35	33.2	45.8	59.7	64.9	68.7
			50	1.14	23.3	33.5	45.3	48.9	54.9
			60	0.99	16.0	23.8	33.5	37.2	41.7
	20	20	40	14.4	33.5	45.0	57.9	64.0	69.4
			50	8.50	24.2	32.1	44.7	47.9	53.1
			60	5.20	15.4	22.3	32.9	36.5	39.1
	30	20	40	21.3	34.4	43.8	58.4	62.3	66.9
			50	13.4	24.1	32.7	45.3	49.7	52.9
			60	8.39	15.3	21.9	33.7	35.8	38.7
	30	30	40	21.3	37.9	42.8	53.0	59.3	62.2
			50	13.4	25.6	32.7	42.1	46.2	47.0
			60	8.39	16.6	22.1	31.1	34.8	36.1
	35	35	40	22.0	38.1	44.2	54.2	59.0	61.9
			50	14.2	26.3	33.3	43.0	45.9	48.2
			60	9.22	18.4	25.1	33.1	35.4	36.4
H	5	5	40	7.21	34.7	53.0	66.0	---	---
			50	3.60	20.9	38.4	49.8	---	---
			60	2.44	14.7	29.3	41.3	---	---
	5	20	40	7.21	46.5	54.9	65.9	---	---
			50	3.60	32.3	42.4	52.9	---	---
			60	2.44	23.9	33.6	41.9	---	---
	20	20	40	29.0	46.4	53.7	64.5	---	---
			50	18.8	32.7	41.5	52.0	---	---
			60	13.5	25.2	32.4	41.5	---	---
	30	20	40	30.8	45.4	52.3	62.8	---	---
			50	22.5	33.3	40.5	51.9	---	---
			60	16.8	24.8	32.0	40.6	---	---
	30	30	40	30.8	47.3	52.7	62.2	---	---
			50	22.5	34.9	41.1	48.3	---	---
			60	16.8	26.6	33.5	38.9	---	---
	35	35	40	33.1	46.8	52.1	61.7	---	---
			50	24.1	34.2	40.7	48.0	---	---
			60	17.4	27.4	33.9	39.2	---	---

表 5.1-1 圧縮強度試験結果 (続き)

セメント種類	練上がり 温度 (℃)	養生温度 (℃)	W/C (%)	圧縮強度(N/mm ²)					
				1 日	3 日	7 日	28 日	56 日	91 日
M	5	5	40	---	7.82	23.9	40.8	49.4	63.4
			50	---	4.65	14.3	26.7	38.8	47.7
			60	---	2.75	8.67	18.6	29.2	37.1
	5	20	40	---	16.7	30.1	53.8	64.9	67.7
			50	---	10.1	19.1	41.1	52.2	56.8
			60	---	6.33	12.5	30.0	41.4	45.6
	20	20	40	---	20.3	29.6	54.9	66.5	68.7
			50	---	12.9	19.4	41.9	53.9	58.6
			60	---	8.00	12.4	30.9	42.8	45.8
	30	20	40	---	23.6	32.6	55.7	64.7	70.2
			50	---	13.0	18.9	42.8	51.0	54.9
			60	---	8.36	11.9	31.8	40.9	44.2
	30	30	40	---	25.1	38.6	61.7	66.8	71.5
			50	---	16.0	25.0	48.2	55.1	59.4
			60	---	10.4	18.3	40.3	45.6	46.3
	35	35	40	---	26.1	39.4	62.0	68.1	72.0
			50	---	17.4	25.4	48.4	56.4	60.1
			60	---	12.1	19.4	40.0	46.5	47.1
L	5	5	40	---	5.93	12.6	25.3	42.6	56.9
			50	---	3.12	6.66	13.4	26.5	40.4
			60	---	1.77	3.74	7.18	18.6	31.2
	5	20	40	---	9.68	16.6	48.3	65.2	71.4
			50	---	5.28	8.89	34.3	48.9	55.7
			60	---	3.27	5.43	24.1	38.9	44.1
	20	20	40	---	13.2	18.2	47.0	63.1	71.4
			50	---	6.90	9.80	33.4	49.9	56.0
			60	---	4.38	5.66	21.3	37.8	42.9
	30	20	40	---	12.8	17.8	45.3	62.7	69.4
			50	---	7.11	9.64	32.0	48.1	53.8
			60	---	5.04	6.33	25.7	39.1	44.1
	30	30	40	---	15.2	25.2	58.6	68.6	71.9
			50	---	8.59	15.6	46.3	55.8	59.4
			60	---	5.88	10.6	37.1	45.9	48.8
	35	35	40	---	16.8	25.7	58.4	69.2	71.4
			50	---	10.1	14.5	45.2	56.8	60.2
			60	---	6.98	11.2	35.9	45.2	48.0
BB	5	5	40	---	7.46	20.0	40.7	53.9	61.3
			50	---	5.28	14.2	30.9	41.7	49.0
			60	---	4.60	11.6	24.8	32.6	40.5
	5	20	40	---	18.5	29.7	53.4	59.4	62.5
			50	---	13.3	23.8	42.0	48.6	53.3
			60	---	11.5	18.2	34.9	41.4	45.7
	20	20	40	---	20.7	31.6	55.0	64.5	67.1
			50	---	13.9	22.1	39.9	46.9	53.1
			60	---	9.77	16.5	32.6	39.6	42.0
	30	20	40	---	21.0	30.4	52.8	60.9	64.2
			50	---	15.1	22.9	38.8	45.7	52.1
			60	---	11.4	19.4	32.8	41.0	43.6
	30	30	40	---	24.7	37.0	55.3	60.5	63.5
			50	---	17.7	28.6	44.7	48.7	50.2
			60	---	15.8	24.5	38.0	42.1	43.6
	35	35	40	---	25.6	37.4	56.1	61.0	63.7
			50	---	18.6	27.9	43.7	49.0	49.9
			60	---	15.7	25.6	37.4	43.0	43.8

表 5.1-2 割裂引張強度試験結果

セメント種類	練上がり 温度 (℃)	養生温度 (℃)	W/C (%)	割裂引張強度(N/mm ²)					
				1 日	3 日	7 日	28 日	56 日	91 日
N	20		40	1.35	2.34	2.97	3.44	3.88	4.00
			50	0.98	2.23	2.55	2.94	3.40	3.58
			60	0.67	1.66	1.96	2.43	2.83	3.03
H			40	2.41	3.07	3.37	3.64	---	---
			50	1.87	2.78	3.08	3.25	---	---
			60	1.18	2.31	2.64	2.97	---	---
M			40	---	1.93	2.19	3.51	3.86	4.11
			50	---	1.40	1.81	2.78	3.41	3.61
			60	---	0.85	1.33	2.35	2.85	3.21
L			40	---	1.51	2.02	3.10	3.84	4.13
			50	---	0.82	1.12	2.73	3.53	3.74
			60	---	0.55	0.74	2.31	3.02	3.31
BB			40	---	1.86	2.45	3.30	3.89	3.99
			50	---	1.42	2.04	2.72	3.35	3.41
			60	---	1.12	1.61	2.33	2.82	2.97

表 5.1-3 ヤング係数測定結果

セメント種類	練上がり 温度 (℃)	養生温度 (℃)	W/C (%)	ヤング係数(kN/mm ²)					
				1 日	3 日	7 日	28 日	56 日	91 日
N	20		40	19.7	28.1	31.3	34.3	35.6	35.8
			50	16.3	26.6	29.0	31.2	31.8	32.0
			60	12.4	22.9	25.9	28.2	29.7	30.4
H			40	24.0	30.8	33.0	36.1	---	---
			50	21.6	27.5	31.4	33.0	---	---
			60	19.9	25.0	27.5	30.7	---	---
M			40	---	24.2	27.5	33.6	35.7	36.4
			50	---	21.1	25.7	30.8	32.7	33.8
			60	---	17.0	20.5	26.7	29.7	31.1
L			40	---	21.3	24.8	32.4	35.0	36.9
			50	---	18.0	21.4	28.0	31.8	32.6
			60	---	13.6	17.4	24.1	28.7	30.2
BB			40	---	22.7	24.8	32.5	35.9	36.8
			50	---	19.6	23.4	31.5	34.2	34.7
			60	---	17.0	21.8	29.8	32.9	33.1

表 5.1-4 曲げ強度試験結果

セメント種類	練上がり 温度 (℃)	養生温度 (℃)	W/C (%)	曲げ強度(N/mm ²)				
				3 日	7 日	28 日	56 日	91 日
N	20		40	5.17	6.08	6.99	7.25	7.50
			50	4.27	4.86	5.87	6.14	6.51
			60	3.26	3.80	4.68	5.06	5.27
H			40	5.66	6.09	6.77	---	---
			50	4.94	5.49	6.19	---	---
			60	4.29	4.77	5.45	---	---
M			40	3.61	4.44	6.28	6.78	6.90
			50	3.03	3.47	5.45	6.22	6.46
			60	2.47	2.82	4.76	5.57	5.77
L			40	3.00	3.45	5.91	6.99	7.25
			50	2.24	2.56	4.75	5.98	6.34
			60	1.99	2.17	3.82	5.22	5.64
BB			40	4.01	4.87	6.69	7.35	7.46
			50	3.17	3.98	5.40	5.86	6.33
			60	2.66	3.33	4.82	5.51	5.67

5.2 セメント水比と圧縮強度の関係

表 5.1-1 に示した圧縮強度試験結果に基づき、セメント水比 (C/W) と圧縮強度 (Fc) の関係を整理した結果を表 5.2-1 に示します。

表 5.2-1 セメント水比と圧縮強度の関係

セメント種類	練上がり温度 (℃)	養生温度 (℃)	材齢 (日)	Fc=A+B(C/W)	
				A	B
N	5	5	1	0.27	0.43
			3	-14.4	12.2
			7	-20.6	24.1
			28	-16.0	29.4
			56	-12.5	31.2
			91	-13.4	33.4
	5	20	1	0.27	0.43
			3	-18.1	20.6
			7	-19.6	26.3
			28	-15.9	29.7
			56	-17.8	33.1
			91	-10.7	32.0
	20	20	1	-13.5	11.1
			3	-19.8	21.5
			7	-22.6	27.1
			28	-14.6	29.4
			56	-17.1	32.7
			91	-20.3	36.1
	30	20	1	-17.5	15.5
			3	-22.1	22.7
			7	-20.6	26.0
			28	-20.7	31.6
			56	-17.5	31.9
			91	-15.8	33.4
	30	30	1	-17.5	15.5
			3	-25.7	25.5
			7	-17.8	24.5
			28	-11.2	25.9
			56	-13.1	29.1
			91	-15.8	31.2
	35	35	1	-16.4	15.4
			3	-21.0	23.6
			7	-12.7	22.8
			28	-8.14	25.1
			56	-11.1	28.2
			91	-13.5	30.3

※適用範囲：40% ≤ W/C ≤ 60%

表 5.2-1 セメント水比と圧縮強度の関係 (続き)

セメント種類	練上がり温度 (℃)	養生温度 (℃)	材齢 (日)	Fc=A+B(C/W)	
				A	B
H	5	5	1	-7.59	5.84
			3	-26.5	24.3
			7	-18.4	28.5
			28	-9.01	29.9
	5	20	1	-7.59	5.84
			3	-21.7	27.2
			7	-8.82	25.5
			28	-5.18	28.6
	20	20	1	-18.1	18.7
			3	-17.8	25.6
			7	-9.82	25.5
			28	-3.64	27.4
	30	20	1	-11.1	16.8
			3	-16.2	24.7
			7	-8.35	24.3
			28	-2.21	26.3
	30	30	1	-11.1	16.8
			3	-14.8	24.8
			7	-4.95	23.1
			28	-7.65	27.9
	35	35	1	-13.7	18.8
			3	-12.0	23.4
			7	-2.82	21.9
			28	-5.93	27.0

※適用範囲：40%≦W/C≦60%

表 5.2-1 セメント水比と圧縮強度の関係 (続き)

セメント種類	練上がり温度 (℃)	養生温度 (℃)	材齢 (日)	Fc=A+B(C/W)	
				A	B
M	5	5	3	-7.47	6.10
			7	-22.1	18.3
			28	-26.3	26.8
			56	-10.2	24.0
			91	-15.4	31.5
	5	20	3	-14.7	12.5
			7	-23.0	21.2
			28	-16.6	28.3
			56	-4.68	28.0
			91	2.95	26.1
	20	20	3	-16.6	14.8
			7	-21.9	20.6
			28	-16.2	28.6
			56	-3.53	28.2
			91	2.39	26.9
	30	20	3	-23.1	18.5
			7	-30.3	25.0
			28	-15.1	28.5
			56	-6.32	28.5
			91	-7.60	31.2
	30	30	3	-19.2	17.7
			7	-23.2	24.6
			28	-2.93	25.8
			56	3.87	25.3
			91	-2.11	29.8
	35	35	3	-16.1	16.8
			7	-21.9	24.3
			28	-4.26	26.5
			56	4.13	25.7
			91	-0.70	29.4

※適用範囲 : $40\% \leq W/C \leq 60\%$

表 5.2-1 セメント水比と圧縮強度の関係 (続き)

セメント種類	練上がり温度 (℃)	養生温度 (℃)	材齢 (日)	Fc=A+B(C/W)	
				A	B
L	5	5	3	-6.76	5.04
			7	-14.4	10.7
			28	-29.7	21.9
			56	-30.5	29.1
			91	-20.9	31.0
	5	20	3	-9.91	7.78
			7	-17.6	13.6
			28	-24.0	29.0
			56	-14.0	31.6
			91	-10.1	32.7
	20	20	3	-13.9	10.7
			7	-20.0	15.2
			28	-28.9	30.6
			56	-11.5	30.0
			91	-13.0	33.9
	30	20	3	-11.2	9.48
			7	-17.5	14.0
			28	-14.5	23.8
			56	-8.39	28.4
			91	-6.78	30.4
	30	30	3	-13.4	11.3
			7	-19.2	17.7
			28	-5.50	25.7
			56	1.04	27.1
			91	3.49	27.5
	35	35	3	-13.2	11.9
			7	-19.4	17.8
			28	-8.90	27.0
			56	-1.48	28.5
			91	3.07	27.6

※適用範囲 : $40\% \leq W/C \leq 60\%$

表 5.2-1 セメント水比と圧縮強度の関係 (続き)

セメント種類	練上がり温度 (℃)	養生温度 (℃)	材齢 (日)	Fc=A+B(C/W)	
				A	B
BB	5	5	3	-1.43	3.51
			7	-5.70	10.2
			28	-7.17	19.1
			56	-9.62	25.5
			91	-0.98	24.9
	5	20	3	-3.16	8.56
			7	-4.14	13.6
			28	-2.30	22.2
			56	5.40	21.6
			91	12.7	20.0
	20	20	3	-12.2	13.2
			7	-14.0	18.2
			28	-13.3	27.1
			56	-12.0	30.3
			91	-7.50	30.0
	30	20	3	-7.89	11.5
			7	-3.19	13.3
			28	-8.52	24.3
			56	-0.94	24.4
			91	2.57	24.7
	30	30	3	-3.09	10.9
			7	-1.09	15.1
			28	3.26	20.8
			56	4.80	22.2
			91	2.91	24.1
	35	35	3	-4.80	12.0
			7	0.41	14.5
			28	-0.78	22.6
			56	6.21	21.8
			91	2.78	24.2

※適用範囲：40%≦W/C≦60%

5.3 圧縮強度発現式

表 5.1-1 に示した圧縮強度試験結果から求めた圧縮強度発現式 (式 5.3-1 参照) を表 5.3-1 に示します。また、これら発現式のグラフの一例を図 5.3-1～図 5.3-15 に示します。

$$F_c(t) = \frac{t}{a + bt} \cdot F_c(t_0) \quad (5.3-1)$$

ここに、 $F_c(t)$: 材齢 t 日の圧縮強度(N/mm²)、 a 、 b : 実験定数、 t_0 : H の場合は 28 日、その他の場合は 91 日

表 5.3-1 圧縮強度発現式

セメント種類	練上がり 温度 (℃)	養生温度 (℃)	W/C (%)	圧縮強度発現式の各定数		
				a	b	$F_c(t_0)$
N	5	5	40	8.05	0.92	69.5
			50	9.74	0.88	54.7
			60	11.5	0.87	41.4
	5	20	40	4.47	0.97	68.7
			50	5.33	0.99	54.9
			60	6.18	0.98	41.7
	20	20	40	3.58	1.01	69.4
			50	4.36	0.98	53.1
			60	5.35	0.96	39.1
	30	20	40	2.78	1.02	66.9
			50	3.58	1.05	52.9
			60	4.88	0.99	38.7
	30	30	40	2.09	1.03	62.2
			50	2.72	0.99	47.0
			60	3.92	0.98	36.1
	35	35	40	1.96	1.03	61.9
			50	2.64	1.00	48.2
			60	3.10	0.98	36.4
H	5	5	40	3.55	0.84	66.0
			50	4.57	0.81	49.8
			60	5.60	0.78	41.3
	5	20	40	2.59	0.87	65.9
			50	3.26	0.85	52.9
			60	3.52	0.84	41.9
	20	20	40	1.29	0.97	64.5
			50	1.93	0.94	52.0
			60	2.21	0.93	41.5
	30	20	40	1.14	0.99	62.8
			50	1.57	0.98	51.9
			60	1.77	0.97	40.6
	30	30	40	1.05	0.98	62.2
			50	1.22	0.97	48.3
			60	1.43	0.95	38.9
	35	35	40	0.92	1.00	61.7
			50	1.11	0.99	48.0
			60	1.35	0.96	39.2

表 5.3-1 圧縮強度発現式（続き）

セメント種類	練上がり 温度 (°C)	養生温度 (°C)	W/C (%)	圧縮強度発現式の各定数		
				a	b	Fe(t ₀)
M	5	5	40	16.9	0.88	63.4
			50	25.7	0.74	47.7
			60	35.6	0.62	37.1
	5	20	40	9.66	0.89	67.7
			50	15.0	0.83	56.8
			60	20.2	0.77	45.6
	20	20	40	9.11	0.90	68.7
			50	14.4	0.84	58.6
			60	19.1	0.77	45.8
	30	20	40	7.67	0.94	70.2
			50	12.5	0.86	54.9
			60	17.1	0.80	44.2
	30	30	40	6.06	0.95	71.5
			50	9.56	0.90	59.4
			60	10.4	0.85	46.3
	35	35	40	5.86	0.95	72.0
			50	9.26	0.90	60.1
			60	9.75	0.86	47.1
L	5	5	40	43.0	0.54	56.9
			50	54.9	0.47	40.4
			60	64.7	0.41	31.2
	5	20	40	21.2	0.75	71.4
			50	28.5	0.66	55.7
			60	34.9	0.58	44.1
	20	20	40	20.0	0.78	71.4
			50	28.0	0.67	56.0
			60	37.6	0.56	42.9
	30	20	40	20.0	0.77	69.4
			50	27.6	0.67	53.8
			60	30.5	0.64	44.1
	30	30	40	12.3	0.84	71.9
			50	16.7	0.78	59.4
			60	19.1	0.75	48.8
	35	35	40	11.5	0.85	71.4
			50	17.7	0.77	60.2
			60	18.4	0.76	48.0
BB	5	5	40	18.4	0.81	61.3
			50	21.8	0.77	49.0
			60	23.0	0.78	40.5
	5	20	40	7.85	0.91	62.5
			50	9.51	0.91	53.3
			60	10.9	0.90	45.7
	20	20	40	7.96	0.91	67.1
			50	10.3	0.92	53.1
			60	11.3	0.87	42.0
	30	20	40	7.58	0.92	64.2
			50	9.19	0.95	52.1
			60	9.73	0.91	43.6
	30	30	40	5.13	0.95	63.5
			50	5.70	0.93	50.2
			60	5.71	0.94	43.6
	35	35	40	4.94	0.95	63.7
			50	5.65	0.93	49.9
			60	5.57	0.94	43.8

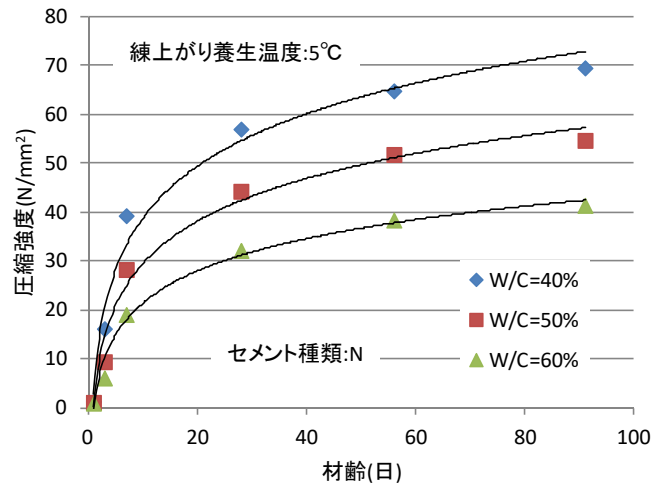


図 5.3-1 圧縮強度発現 (セメント種類:N, 練上がり養生温度:5°C)

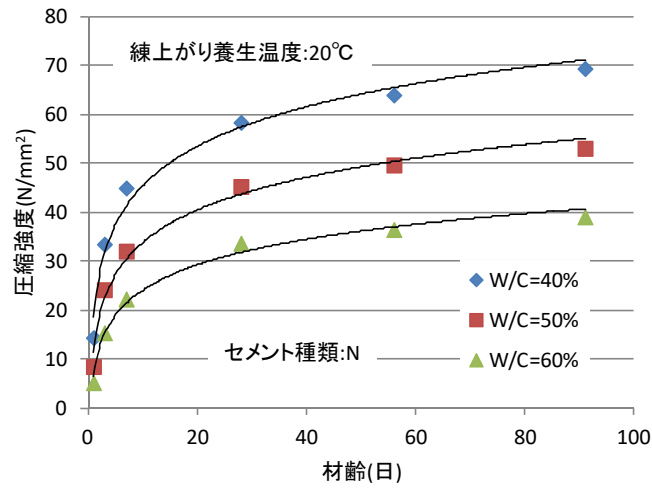


図 5.3-2 圧縮強度発現 (セメント種類:N, 練上がり養生温度:20°C)

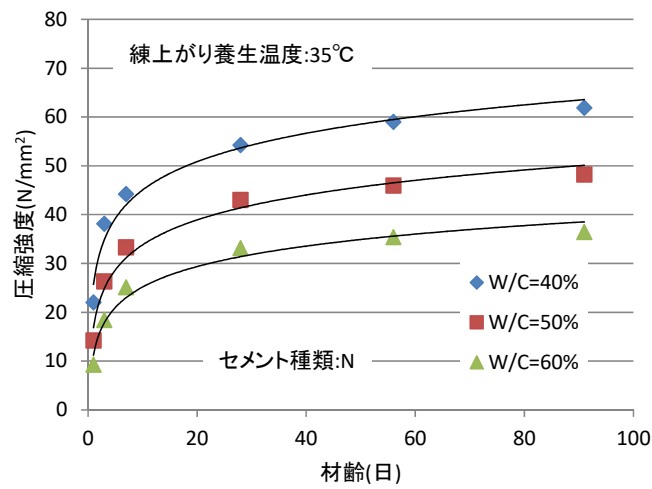


図 5.3-3 圧縮強度発現 (セメント種類:N, 練上がり養生温度:35°C)

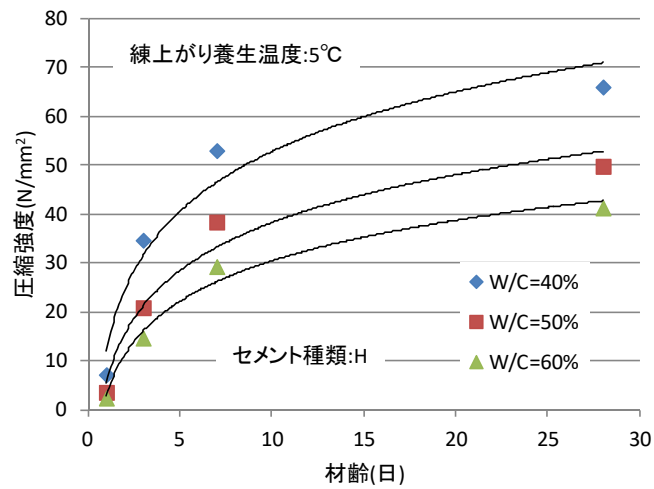


図 5.3-4 圧縮強度発現 (セメント種類:H, 練上がり養生温度:5°C)

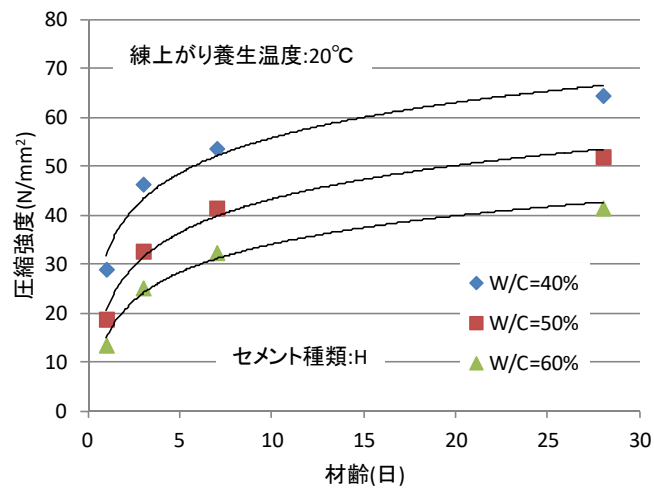


図 5.3-5 圧縮強度発現 (セメント種類:H, 練上がり養生温度:20°C)

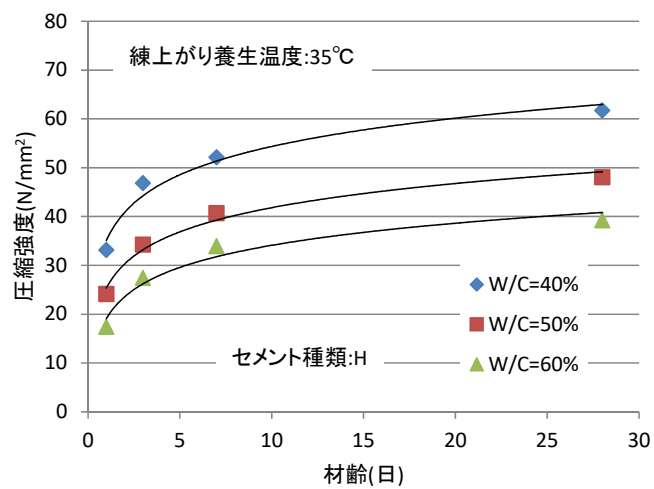


図 5.3-6 圧縮強度発現 (セメント種類:H, 練上がり養生温度:35°C)

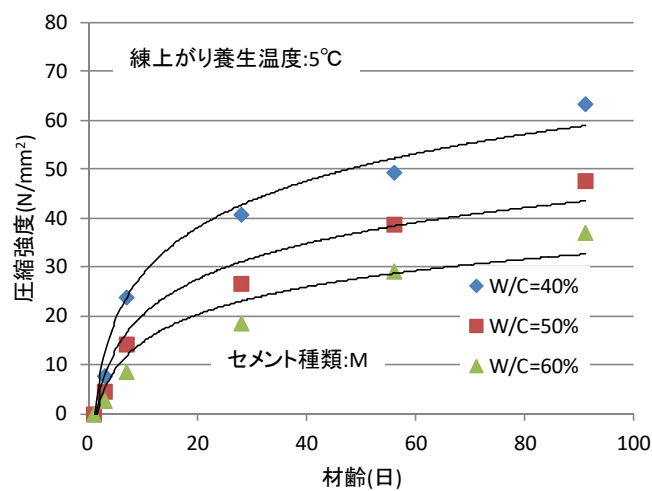


図 5.3-7 圧縮強度発現 (セメント種類:M, 練上がり養生温度:5°C)

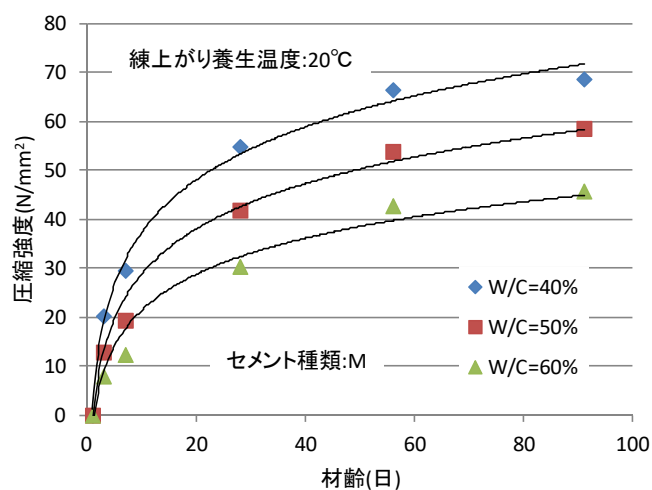


図 5.3-8 圧縮強度発現 (セメント種類:M, 練上がり養生温度:20°C)

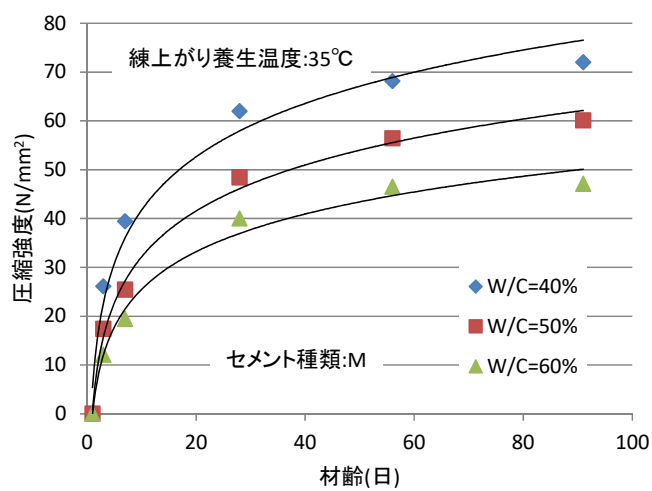


図 5.3-9 圧縮強度発現 (セメント種類:M, 練上がり養生温度:35°C)

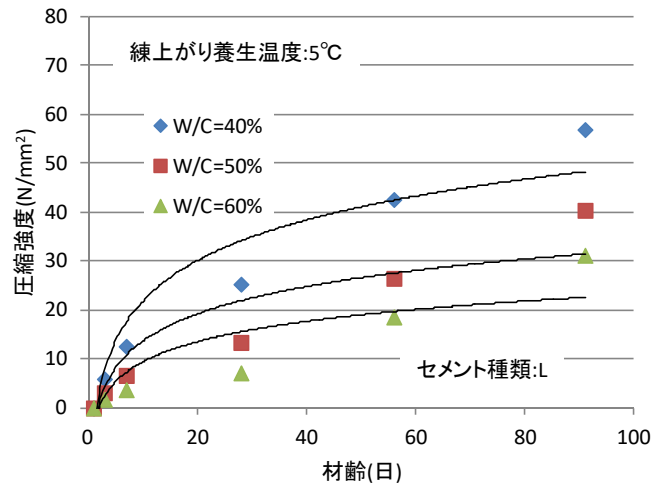


図 5.3-10 圧縮強度発現 (セメント種類:L, 練上がり養生温度:5°C)

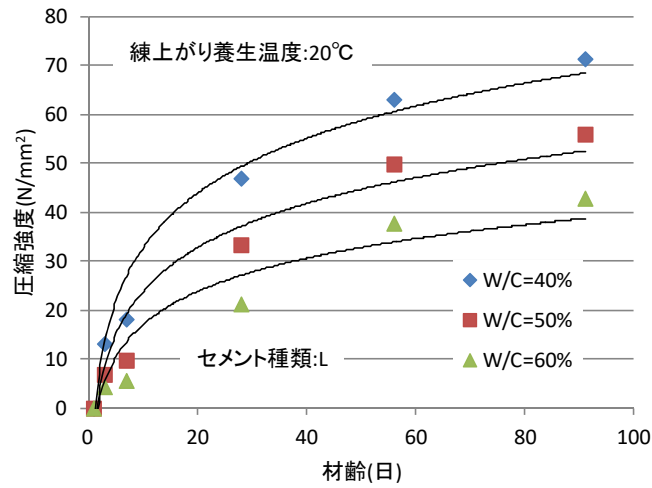


図 5.3-11 圧縮強度発現 (セメント種類:L, 練上がり養生温度:20°C)

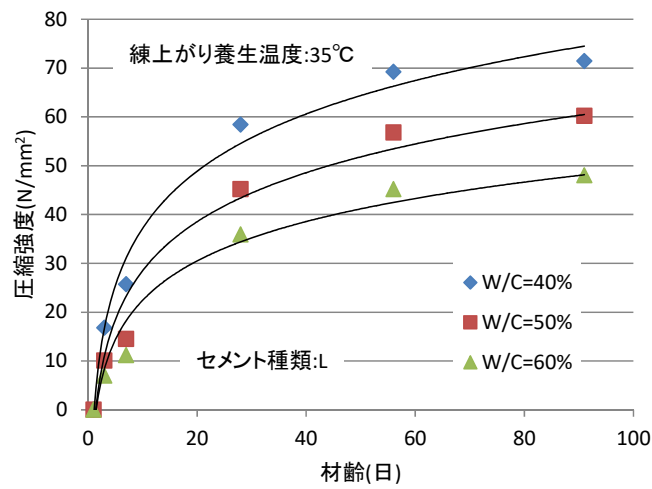


図 5.3-12 圧縮強度発現 (セメント種類:L, 練上がり養生温度:35°C)

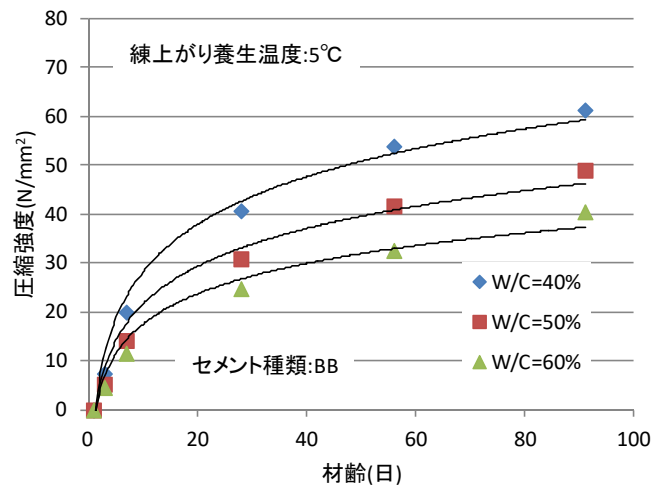


図 5.3-13 圧縮強度発現 (セメント種類:BB, 練上がり養生温度:5°C)

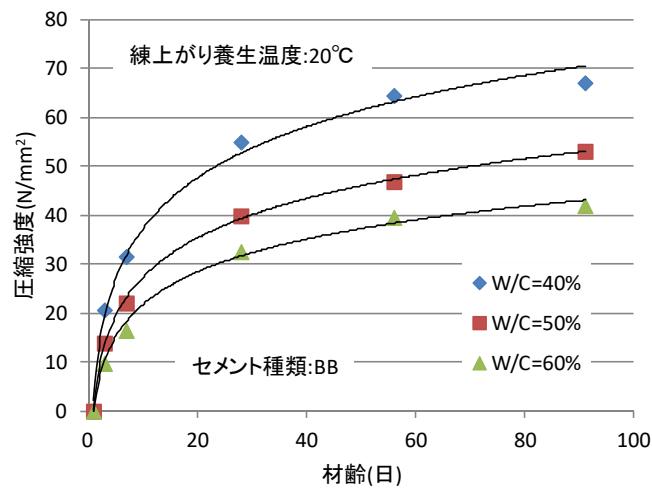


図 5.3-14 圧縮強度発現 (セメント種類:BB, 練上がり養生温度:20°C)

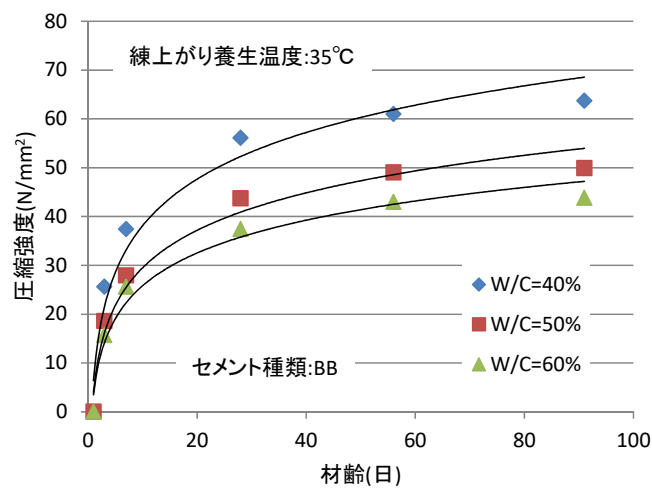


図 5.3-15 圧縮強度発現 (セメント種類:BB, 練上がり養生温度:35°C)

これまでは、圧縮強度発現を練上がり養生温度、水セメント比ごとに整理してきました。ここで、温度の影響を加味した有効材齢（練上がり養生温度を 20℃に換算した場合の等価材齢，式 5.3-2 参照）を変数とすることで圧縮強度発現式を水セメント比ごとに整理することができます。日本コンクリート工学協会 マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016 では、有効材齢を変数とした圧縮強度発現式を提示しています。したがって、本技術資料では上記指針と同様の形式でも圧縮強度発現を整理することとしました。この結果は表 5.3-2，図 5.3-16～図 5.3-20 に示す通りです。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left\{ \frac{4000}{273+20} - \frac{4000}{273+T(\Delta t_i)} \right\} \quad (5.3-2)$$

ここに、 t_e ：有効材齢(日)， Δt_i ：ある一定の温度が継続する期間(日)， $T(\Delta t_i)$ ： Δt_i の間継続する温度(℃)

表 5.3-2 有効材齢を変数とした圧縮強度発現式

セメント 種類	W/C (%)	圧縮強度発現式 $F_c(t_e) = \frac{t_e}{a'+b't_e} \cdot F_c(t_0)$ の各定数			任意の水セメント比における a' ， b' の算定式
		a'	b'	$F_c(t_0)$	
N	40	3.63	1.07	69.4	$a'=8.84-2.11C/W$ $b'=0.87+0.08C/W$
	50	4.47	1.04	53.1	
	60	5.42	1.00	39.1	
H	40	1.51	1.00	64.5	$a'=4.13-1.05C/W$ $b'=0.93+0.03C/W$
	50	2.04	1.01	52.0	
	60	2.38	0.97	41.5	
M	40	9.55	0.91	68.7	$a'=35.7-10.4C/W$ $b'=0.66+0.10C/W$
	50	15.4	0.88	58.6	
	60	18.1	0.82	45.8	
L	40	20.6	0.83	71.4	$a'=62.1-16.5C/W$ $b'=0.22+0.24C/W$
	50	29.8	0.70	56.0	
	60	34.2	0.63	42.9	
BB	40	8.51	0.98	67.1	$a'=13.3-1.87C/W$ $b'=0.74+0.10C/W$
	50	9.95	0.97	53.1	
	60	10.0	0.89	42.0	

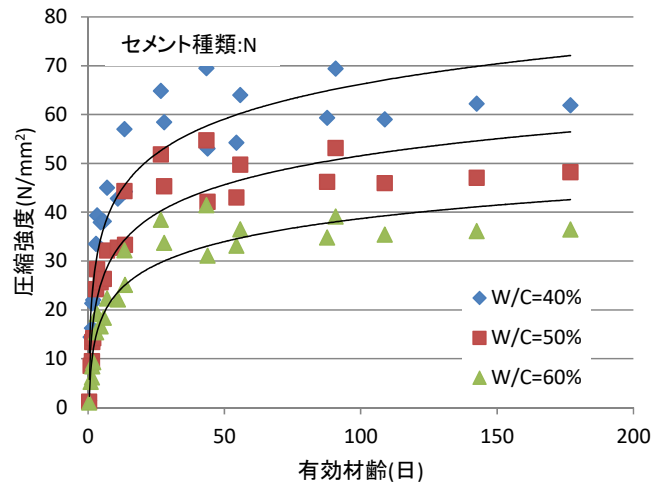


図 5.3-16 有効材齢による圧縮強度発現（セメント種類:N）

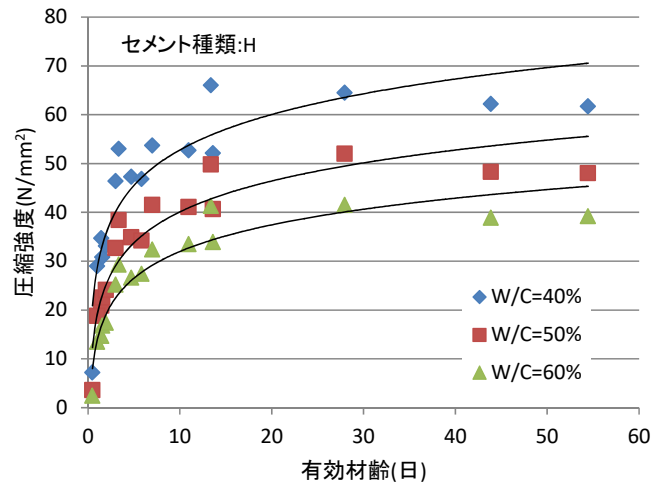


図 5.3-17 有効材齢による圧縮強度発現（セメント種類:H）

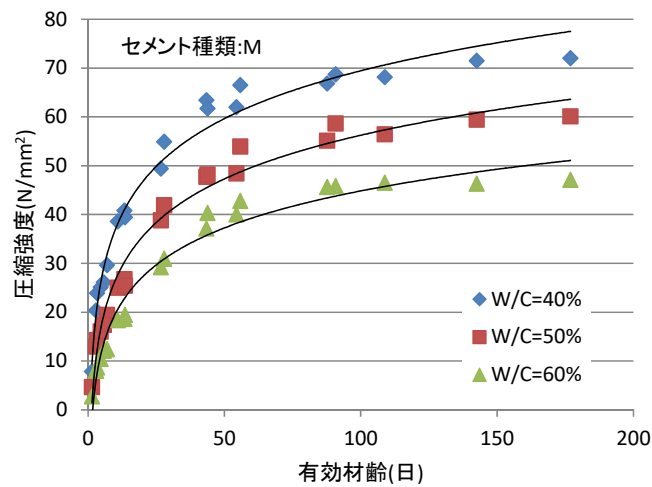


図 5.3-18 有効材齢による圧縮強度発現（セメント種類:M）

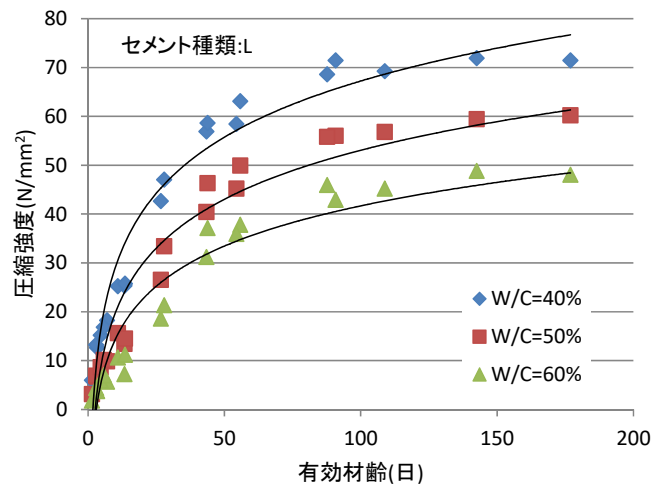


図 5.3-19 有効材齢による圧縮強度発現（セメント種類:L）

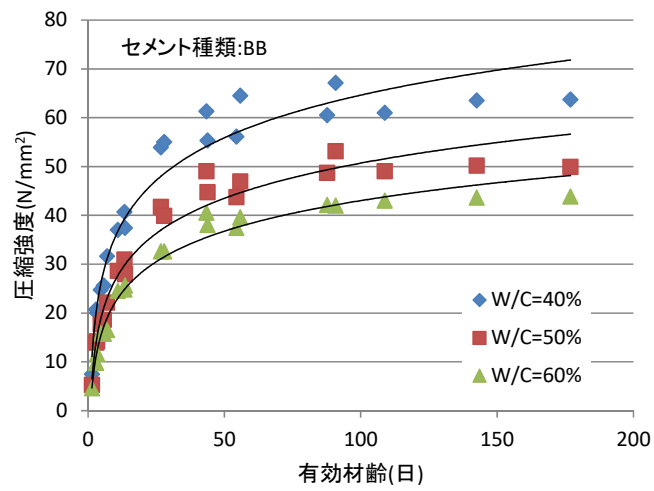


図 5.3-20 有効材齢による圧縮強度発現（セメント種類:BB）

5.4 積算温度と圧縮強度の関係

前節において有効材齢による圧縮強度発現式を求めることによって、これら発現式を水セメント比ごとに整理しました。同様の整理方法として、変数を積算温度（式 5.4-1 参照）とするケースがあります。本節では、積算温度と圧縮強度の関係を求めることで圧縮強度発現を水セメント比ごとに整理しました。これらの結果を表 5.4-1、図 5.4-1～図 5.4-5 に示します。

$$M = \sum_{Z=1}^Z (\theta + 10) \quad (5.4-1)$$

ここに、 M ：積算温度(日・℃)， θ ：材齢 Z 日におけるコンクリートの平均養生温度(℃)，たとえば養生温度 30℃一定で材齢 28 日の積算温度は $M=28 \times (30+10)=1120$ (日・℃)であり，養生温度 30℃一定で 3 日間養生後に 20℃で 25 日間養生した場合では $M=3 \times (30+10)+25 \times (20+10)=870$ (日・℃)となる。

表 5.4-1 積算温度と圧縮強度の関係

セメント 種類	W/C (%)	積算温度と圧縮強度の関係式 $F_c(M)=c+d \cdot \log M$ の各定数	
		c	d
N	40	-17.2	24.5
	50	-18.0	20.4
	60	-16.5	16.2
H	40	-8.56	25.3
	50	-13.2	22.0
	60	-13.9	18.9
M	40	-46.9 (0 ≤ M ≤ 420)	34.2 (0 ≤ M ≤ 420)
		-35.7 (420 ≤ M)	30.6 (420 ≤ M)
	50	-32.3 (0 ≤ M ≤ 420)	22.9 (0 ≤ M ≤ 420)
		-55.8 (420 ≤ M)	33.0 (420 ≤ M)
	60	-26.8 (0 ≤ M ≤ 420)	17.8 (0 ≤ M ≤ 420)
		-52.0 (420 ≤ M)	28.5 (420 ≤ M)
L	40	-29.9 (0 ≤ M ≤ 420)	21.6 (0 ≤ M ≤ 420)
		-90.0 (420 ≤ M)	46.5 (420 ≤ M)
	50	-17.5 (0 ≤ M ≤ 420)	12.5 (0 ≤ M ≤ 420)
		-107 (420 ≤ M)	47.6 (420 ≤ M)
	60	-11.7 (0 ≤ M ≤ 420)	8.26 (0 ≤ M ≤ 420)
		-101 (420 ≤ M)	42.7 (420 ≤ M)
BB	40	-38.3	30.2
	50	-34.1	24.8
	60	-30.2	21.4

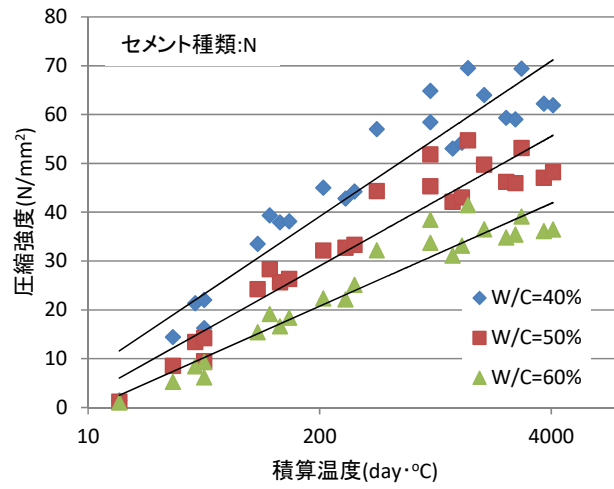


図 5.4-1 積算温度と圧縮強度の関係 (セメント種類:N)

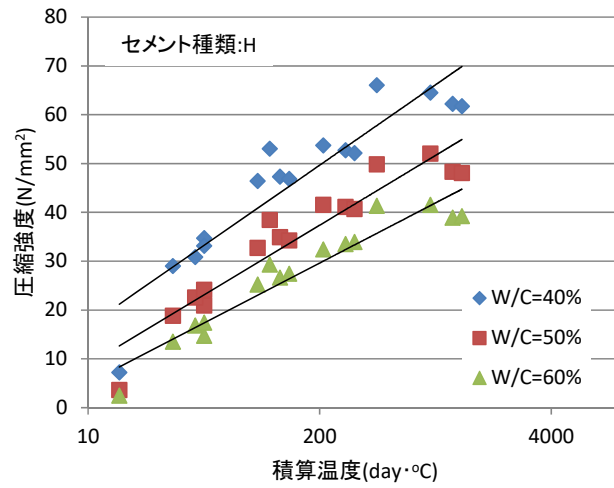


図 5.4-2 積算温度と圧縮強度の関係 (セメント種類:H)

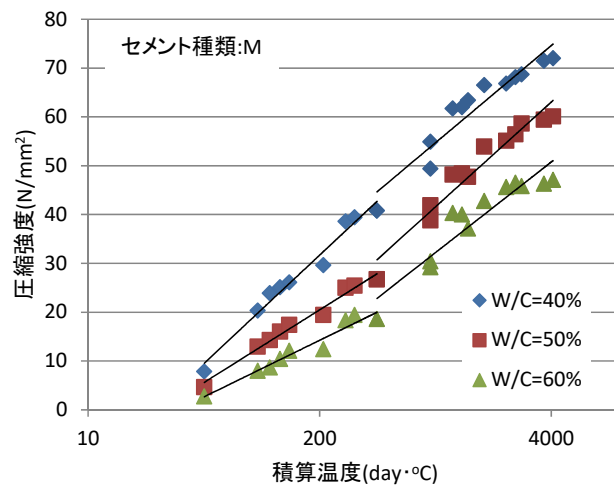


図 5.4-3 積算温度と圧縮強度の関係 (セメント種類:M)

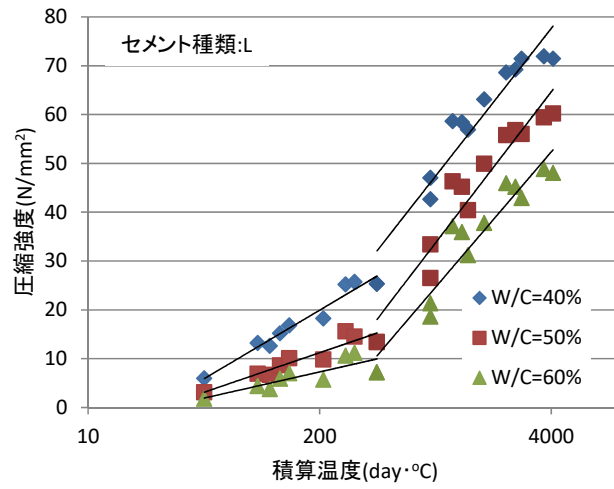


図 5.4-4 積算温度と圧縮強度の関係（セメント種類:L）

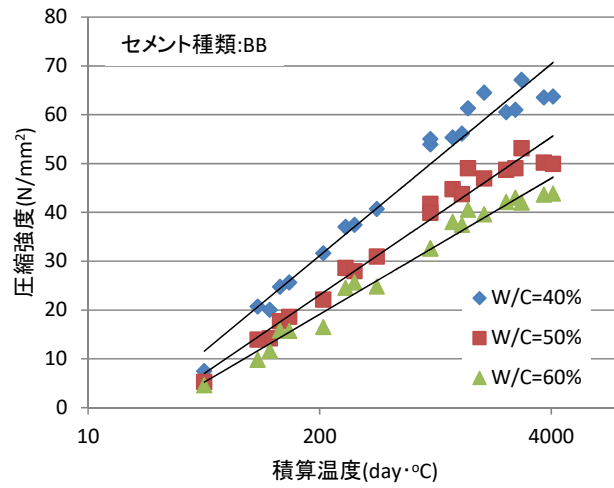


図 5.4-5 積算温度と圧縮強度の関係（セメント種類:BB）

5.5 圧縮強度と割裂引張強度の関係

圧縮強度と割裂引張強度の関係は図 5.5-1 に示す通りです。なお、両者の関係式は図中に示す通りであり、このような関係式は、温度応力解析等に用いられています。よって、弊社のセメントを対象に温度応力解析を実施するような場合には図 5.5-1 中に示した関係式をご活用下さい。

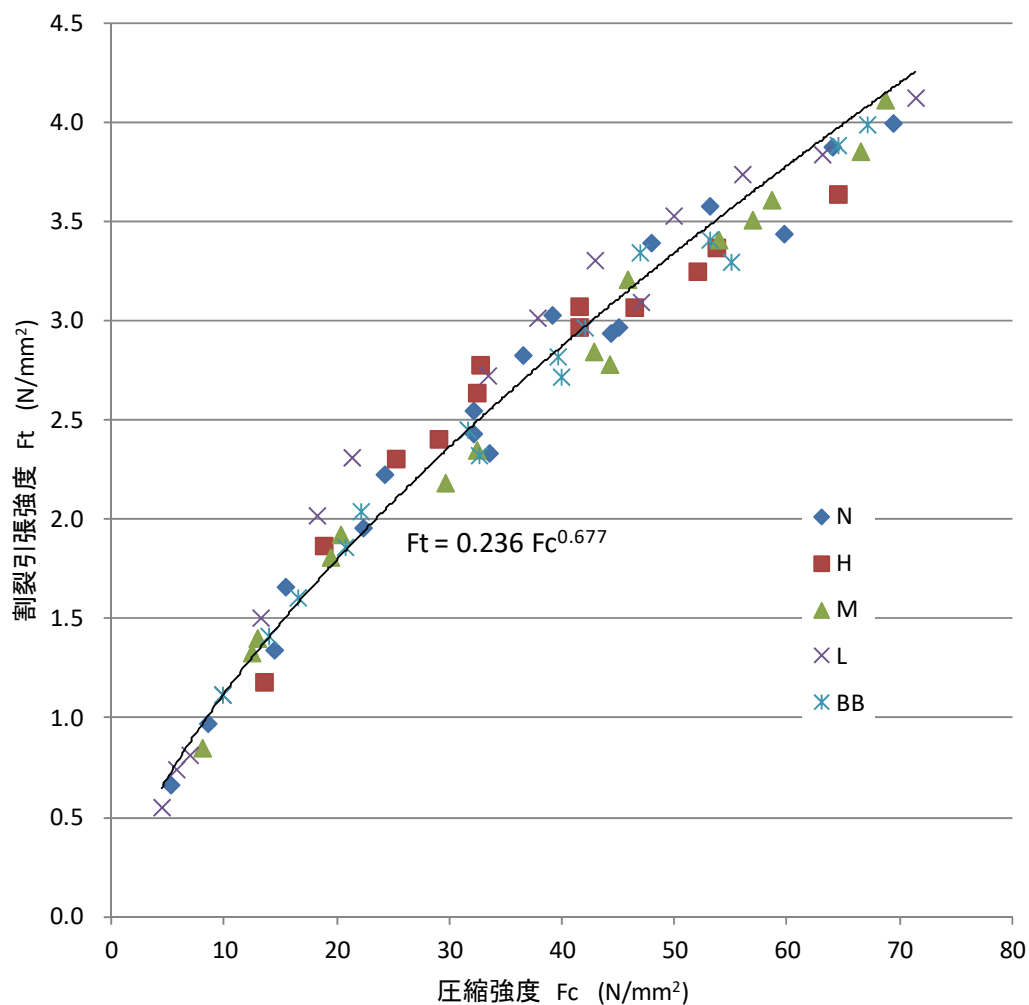


図 5.5-1 圧縮強度と割裂引張強度の関係

5.6 圧縮強度とヤング係数の関係

圧縮強度とヤング係数の関係は図 5.6-1 に示す通りです。なお、両者の関係式は図中に示す通りであり、このような関係式は、温度応力解析等に用いられています。よって、弊社のセメントを対象に温度応力解析を実施するような場合には図 5.6-1 中に示した関係式をご活用下さい。

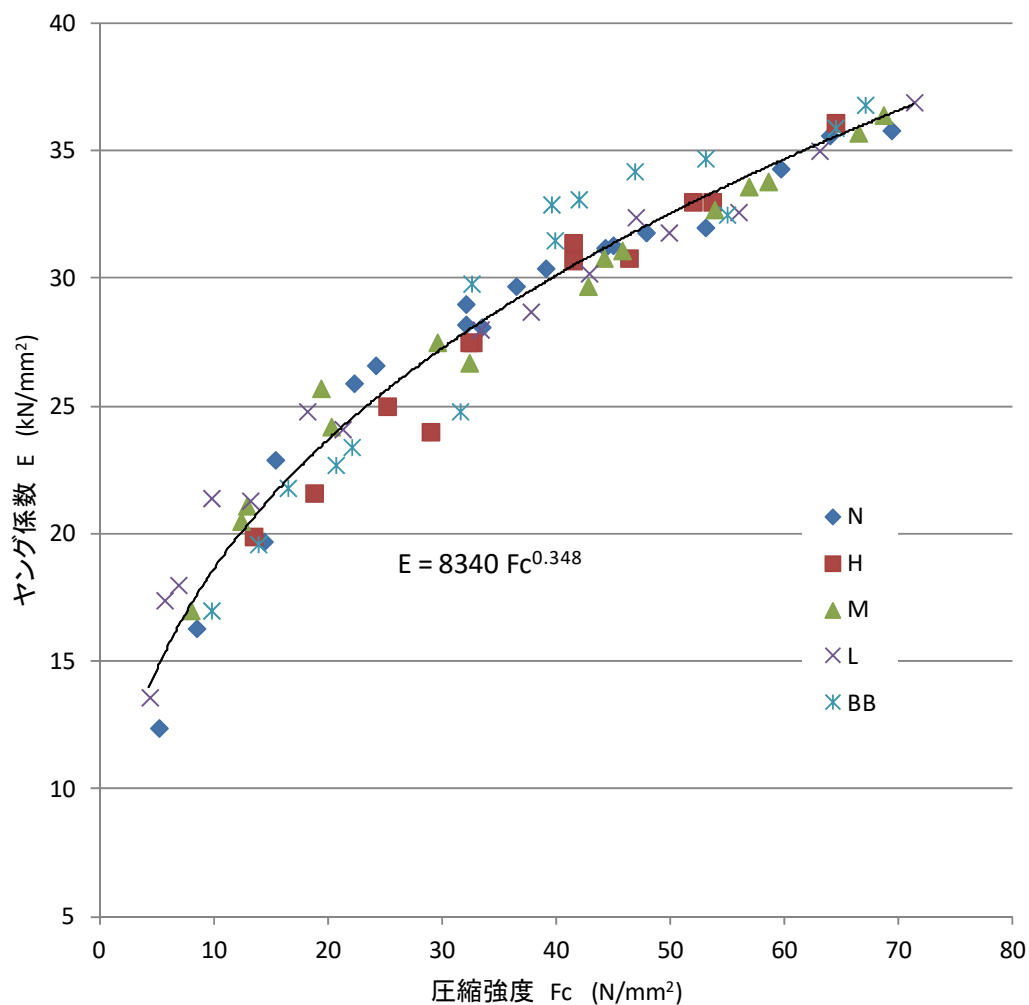


図 5.6-1 圧縮強度とヤング係数の関係

5.7 圧縮強度と曲げ強度の関係

圧縮強度と曲げ強度の関係は図 5.7-1 に示す通りです。なお、両者の関係式は図中に示す通りです。舗装コンクリートの強度管理では、通常、曲げ強度が対象となります。しかし、曲げ強度のデータを数多く蓄積されている事例は少ないと思われます。よって、圧縮強度から曲げ強度の目安を立てるような場合に図中に示した関係式をご活用下さい。

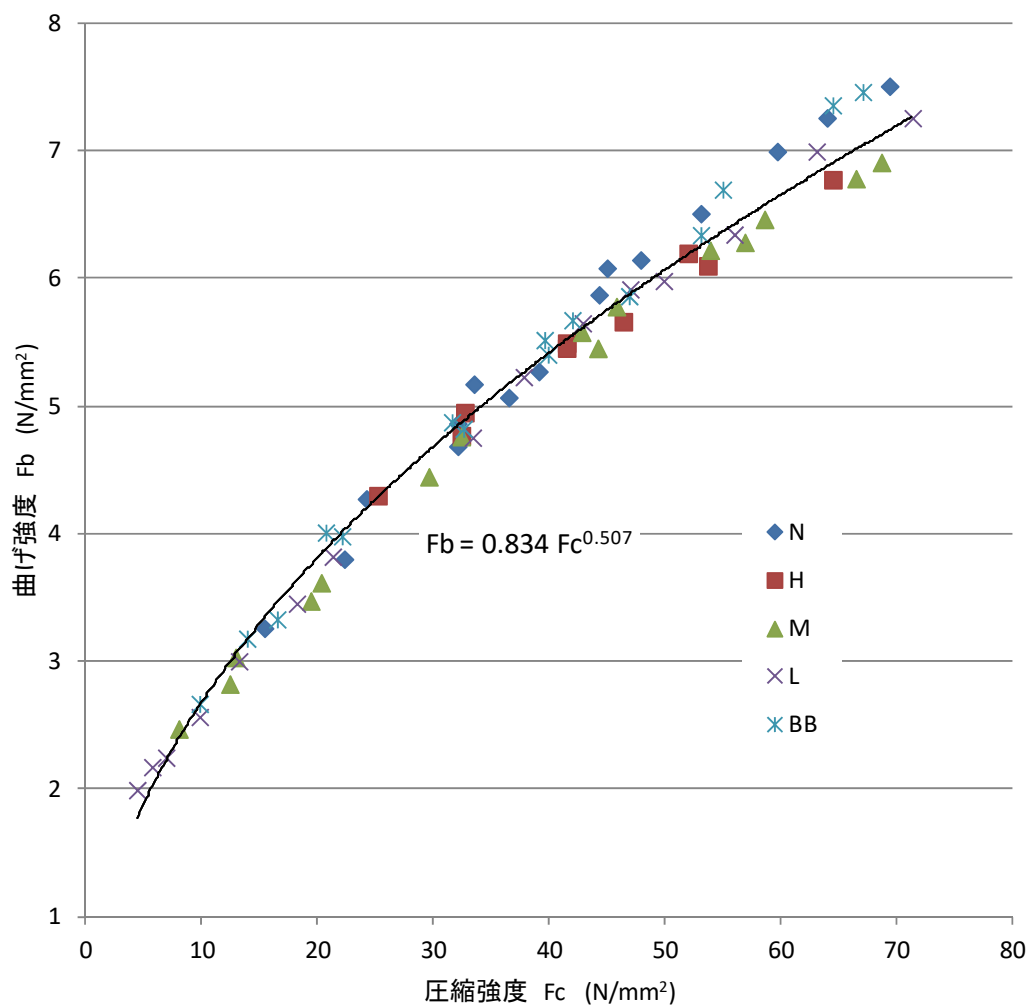


図 5.7-1 圧縮強度と曲げ強度の関係

6. 断熱温度上昇特性

6.1 断熱温度上昇試験結果の一例

単位セメント量 300kg/m^3 ，打込み温度 20°C の条件における断熱温度上昇試験結果を図 6.1-1 に示します。

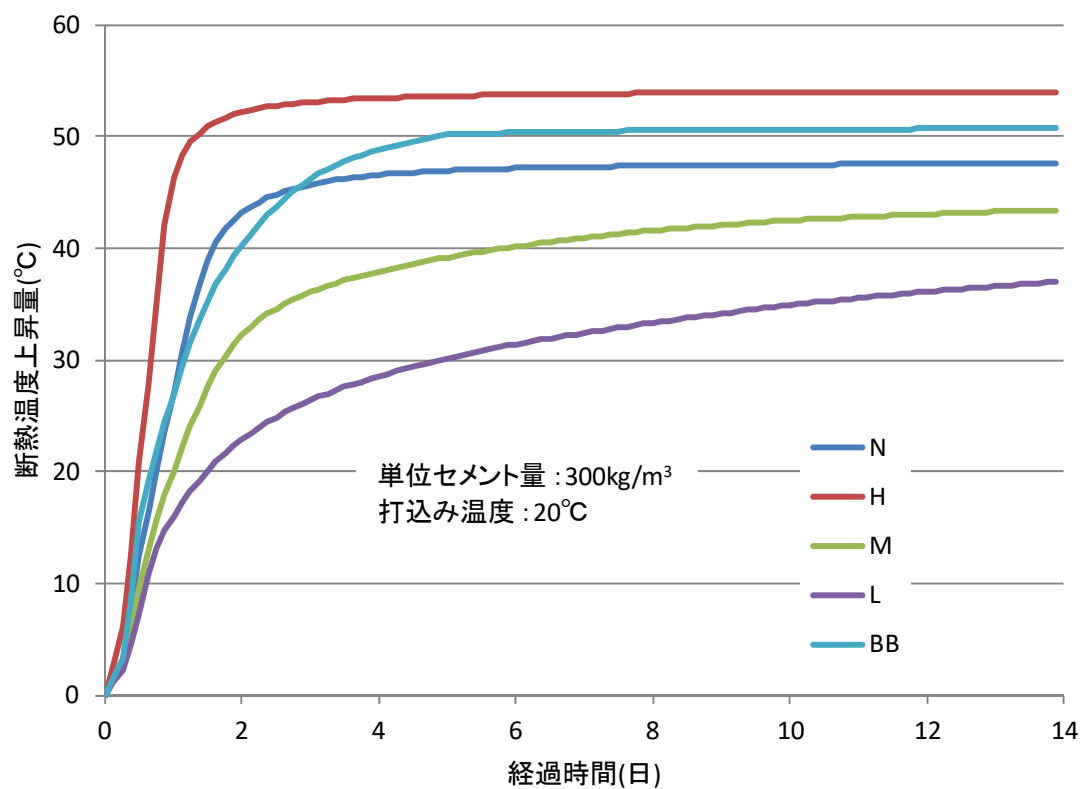


図 6.1-1 断熱温度上昇試験結果の一例（単位セメント量 300kg/m^3 ，打込み温度 20°C ）

6.2 断熱温度上昇曲線

断熱温度上昇試験結果を式(6.2-1)もしくは式(6.2-2)で近似した結果を表 6.2-1 に示します。
なお、式(6.2-1)と式(6.2-2)は、セメント毎の断熱温度上昇曲線の特徴に合わせて使い分けています。

$$Q(t)=Q_{\infty}\{1-\exp(-\alpha t)\} \quad (6.2-1)$$

$$Q(t)=Q_{\infty}\{1-\exp(-\beta t^{\gamma})\} \quad (6.2-2)$$

ここに、 Q_{∞} ：終局断熱温度上昇量(°C)、 t ：材齢(日)、 α 、 β 、 γ ：実験定数

表 6.2-1 断熱温度上昇曲線

セメント 種類	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	Q(t)=Q _∞ {1-exp(-αt)}		Q(t)=Q _∞ {1-exp(-βt ^γ)}		
			Q _∞	α	Q _∞	β	γ
N	250	10	40.7	0.432	---	---	---
		20	39.6	0.810	---	---	---
		30	38.6	1.409	---	---	---
		35	38.4	1.816	---	---	---
	300	10	48.8	0.507	---	---	---
		20	47.7	0.933	---	---	---
		30	46.5	1.585	---	---	---
		35	46.5	2.018	---	---	---
	400	10	62.3	0.637	---	---	---
		20	61.4	1.119	---	---	---
		30	60.2	1.824	---	---	---
		35	60.1	2.306	---	---	---
	500	10	68.3	0.782	---	---	---
		20	67.7	1.333	---	---	---
		30	66.5	2.107	---	---	---
H	250	10	46.8	0.721	---	---	---
		20	45.8	1.281	---	---	---
		30	44.3	2.173	---	---	---
		35	43.0	2.834	---	---	---
	300	10	55.2	0.814	---	---	---
		20	54.1	1.409	---	---	---
		30	52.4	2.363	---	---	---
		35	51.0	3.031	---	---	---
	400	10	68.0	0.956	---	---	---
		20	66.8	1.614	---	---	---
		30	65.6	2.655	---	---	---
		35	63.3	3.557	---	---	---
	450	10	70.6	1.060	---	---	---
		20	69.5	1.817	---	---	---
		30	68.0	2.756	---	---	---

表 6.2-1 断熱温度上昇曲線（続き）

セメント 種類	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	Q(t)=Q _∞ {1-exp(-αt)}		Q(t)=Q _∞ {1-exp(-βt ^γ)}		
			Q _∞	α	Q _∞	β	γ
M	250	10	---	---	34.1	0.302	1.164
		20	---	---	35.2	0.602	0.956
		30	---	---	36.0	0.919	0.789
		35	---	---	35.8	1.078	0.725
	300	10	---	---	41.1	0.323	1.194
		20	---	---	42.3	0.644	0.981
		30	---	---	42.7	0.998	0.839
		35	---	---	42.4	1.188	0.793
	400	10	---	---	52.4	0.380	1.299
		20	---	---	53.0	0.772	1.127
		30	---	---	53.0	1.275	1.010
		35	---	---	52.2	1.582	0.983
	500	10	---	---	58.0	0.467	1.476
		20	---	---	58.5	1.010	1.318
		30	---	---	58.3	1.840	1.261
L	250	10	---	---	27.6	0.325	0.946
		20	---	---	30.2	0.523	0.749
		30	---	---	32.8	0.664	0.610
		35	---	---	33.6	0.750	0.539
	300	10	---	---	33.7	0.332	0.957
		20	---	---	37.0	0.530	0.745
		30	---	---	38.8	0.701	0.643
		35	---	---	38.7	0.835	0.589
	400	10	---	---	44.5	0.357	0.991
		20	---	---	46.1	0.611	0.838
		30	---	---	46.6	0.870	0.753
		35	---	---	45.9	1.104	0.691
	500	10	---	---	49.9	0.409	1.126
		20	---	---	50.8	0.758	0.967
		30	---	---	51.0	1.125	0.881
BB	250	10	44.6	0.351	---	---	---
		20	43.2	0.671	---	---	---
		30	42.5	1.123	---	---	---
		35	42.3	1.582	---	---	---
	300	10	52.1	0.412	---	---	---
		20	50.8	0.769	---	---	---
		30	50.0	1.275	---	---	---
		35	50.0	1.768	---	---	---
	400	10	62.1	0.546	---	---	---
		20	61.9	0.957	---	---	---
		30	61.5	1.540	---	---	---
		35	60.5	2.157	---	---	---
	500	10	64.9	0.733	---	---	---
		20	64.7	1.275	---	---	---
		30	64.2	2.055	---	---	---

ここで、打込み温度 20℃における単位セメント量と断熱温度上昇曲線の係数である終局断熱温度上昇量との関係を図 6.2-1 に示します。ご覧の通り、終局断熱温度上昇量は単位セメント量の増加に伴って高くなりますが、単位セメント量が 400kg/m³を超えたあたりから、その傾きは緩やかになります。

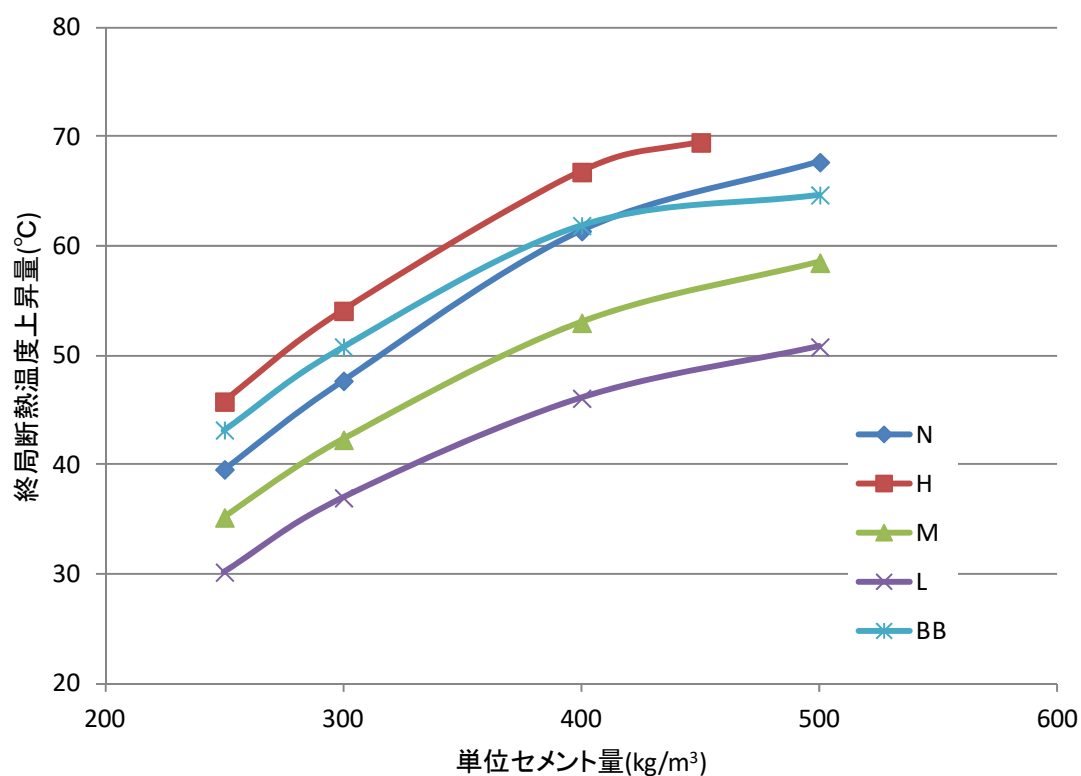


図 6.2-1 単位セメント量と終局断熱温度上昇量の関係

表 6.2-1 に示した断熱温度上昇曲線は、温度解析における発熱特性の入力値として活用されます。そこで、表 6.2-1 に示した単位セメント量、打込み温度以外の条件で断熱温度上昇曲線を求めるために、断熱温度上昇曲線における係数の算定表を表 6.2-2 に示しましたのでご活用下さい。

表 6.2-2 断熱温度上昇曲線の係数の算定表($250\text{kg/m}^3 \leq W_c \leq 400\text{kg/m}^3$)

セメント 種類		$250\text{kg/m}^3 \leq W_c \leq 400\text{kg/m}^3$	
N	$Q_\infty = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 6.20424 + 0.14303W_c$	$B = -0.09920 + 0.00001211W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -0.34136 + 0.00060177W_c$	$D = 0.03735 + 0.00007269W_c$
H	$Q_\infty = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 13.7493 + 0.14140194W_c$	$B = -0.11516 - 0.00014625W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -0.21864 + 0.00003349W_c$	$D = 0.05202 + 0.00012276W_c$
M	$Q_\infty = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 2.32748 + 0.1264092W_c$	$B = 0.20298 - 0.00050896W_c$
	$\beta = C + D \cdot T_{ini}$	$C = 0.20558 - 0.0008386W_c$	$D = 0.00147 + 0.00011483W_c$
	$\gamma = E + F \cdot T_{ini}$	$E = 1.17577 + 0.0005708W_c$	$F = -0.02576 + 0.00003239W_c$
L	$Q_\infty = A + B \cdot T_{ini}$	$A = -6.08172 + 0.12626877W_c$	$B = 0.56622 - 0.00124891W_c$
	$\beta = C + D \cdot T_{ini}$	$C = 0.37284 - 0.00080651W_c$	$D = -0.00457 + 0.00008304W_c$
	$\gamma = E + F \cdot T_{ini}$	$E = 1.07751 + 0.00003247W_c$	$F = -0.0234 + 0.00002954W_c$
BB	$Q_\infty = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 17.3751 + 0.1145569W_c$	$B = -0.15421 + 0.00023971W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -0.2382 + 0.00017378W_c$	$D = 0.02347 + 0.00009596W_c$

T_{ini} : 打込み温度($^{\circ}\text{C}$), W_c : 単位セメント量(kg/m^3)

表 6.2-2 断熱温度上昇曲線の係数の算定表($400\text{kg/m}^3 \leq W_c \leq 500\text{kg/m}^3$)

セメント 種類		$400\text{kg/m}^3 \leq W_c \leq 500(450^*)\text{kg/m}^3$	
N	$Q_\infty = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 38.9102 + 0.06077966W_c$	$B = -0.10780 + 0.00003559W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -0.82544 + 0.00181554W_c$	$D = 0.06568 + 0.00000114W_c$
H	$Q_\infty = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 54.3277 + 0.03919774W_c$	$B = -0.50678 + 0.00083729W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -3.3804 + 0.00791571W_c$	$D = 0.23472 - 0.00033315W_c$
M	$Q_\infty = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 31.6249 + 0.05268362W_c$	$B = -0.07017 + 0.00017034W_c$
	$\beta = C + D \cdot T_{ini}$	$C = 0.39789 - 0.00133045W_c$	$D = -0.03533 + 0.00020796W_c$
	$\gamma = E + F \cdot T_{ini}$	$E = 0.77588 + 0.00158158W_c$	$F = -0.02095 + 0.00002040W_c$
L	$Q_\infty = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 23.6418 + 0.05164972W_c$	$B = 0.09017 - 0.00007034W_c$
	$\beta = C + D \cdot T_{ini}$	$C = 0.05342 - 0.00001085W_c$	$D = 0.00131 + 0.00006898W_c$
	$\gamma = E + F \cdot T_{ini}$	$E = 0.52704 + 0.00141859W_c$	$F = -0.00915 - 0.00000619W_c$
BB	$Q_\infty = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 53.0627 + 0.02447458W_c$	$B = -0.14475 + 0.00021949W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -0.9701 + 0.00200486W_c$	$D = 0.04468 + 0.00004283W_c$

T_{ini} : 打込み温度($^{\circ}\text{C}$), W_c : 単位セメント量(kg/m^3), * : H のケースは $W_c = 450\text{kg/m}^3$ が上限

7. 収縮特性

7.1 乾燥収縮

各セメントを使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を表 7.1-1, 材齢 6 ヶ月の乾燥収縮ひずみを図 7.1-1 に示します。単位水量 170kg/m^3 , 水セメント比 50% は全て同じ条件であり, 主な使用材料は, 細骨材として陸砂 (絶乾密度: 2.56g/cm^3 , 吸水率:1.72%), 粗骨材として砂岩碎石 (絶乾密度: 2.64g/cm^3 , 吸水率:0.55%) を使用しています。

表 7.1-1 乾燥収縮ひずみの測定結果

セメント 種類	乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)				
	7 日	28 日	56 日	91 日	182 日
N	185	422	562	650	746
H	163	403	542	625	701
M	198	422	554	631	724
L	199	445	545	622	717
BB	190	443	587	686	768

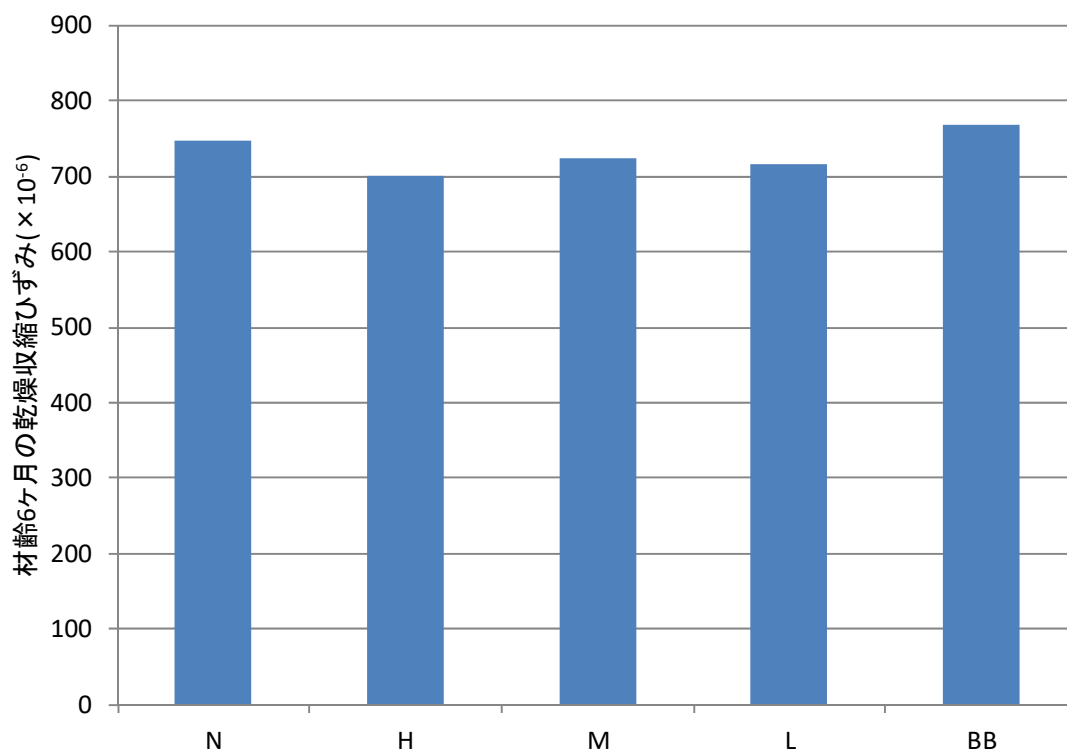


図 7.1-1 セメント種類ごとのコンクリートの乾燥収縮ひずみ

図 7.1-1 から、配合や材料が同一条件であれば、乾燥収縮ひずみはセメントの種類が変わっても大差ないことが分かります。 N の乾燥収縮ひずみを基準とした場合 (100%)、H は 94%、M は 97%、L は 96%、BB は 103%であり、この数値からも乾燥収縮ひずみに及ぼすセメント種類の影響は小さいことが分かります。

7.2 自己収縮

各セメントを使用したコンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を表 7.2-1, 材齢 3 ヶ月の自己収縮ひずみを図 7.2-1 に示します. 主な使用材料は, 細骨材として陸砂 (絶乾密度:2.56g/cm³, 吸水率:1.72%), 粗骨材として砂岩碎石 (絶乾密度:2.64g/cm³, 吸水率:0.55%) を使用しています.

表 7.2-1 自己収縮ひずみの測定結果

セメント 種類	W/C (%)	自己収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)				
		3 日	7 日	28 日	56 日	91 日
N	27	298	328	407	446	485
	35	171	188	232	254	276
	45	54	64	90	108	120
H	27	328	362	483	546	575
	35	188	210	280	322	346
	45	88	93	131	157	181
M	27	151	171	222	265	285
	35	66	69	99	118	126
	45	3	9	50	52	53
L	27	51	77	168	220	232
	35	23	36	88	100	105
	45	1	2	33	33	35
BB	27	379	454	534	567	587
	35	263	313	367	369	372
	45	110	148	183	203	218

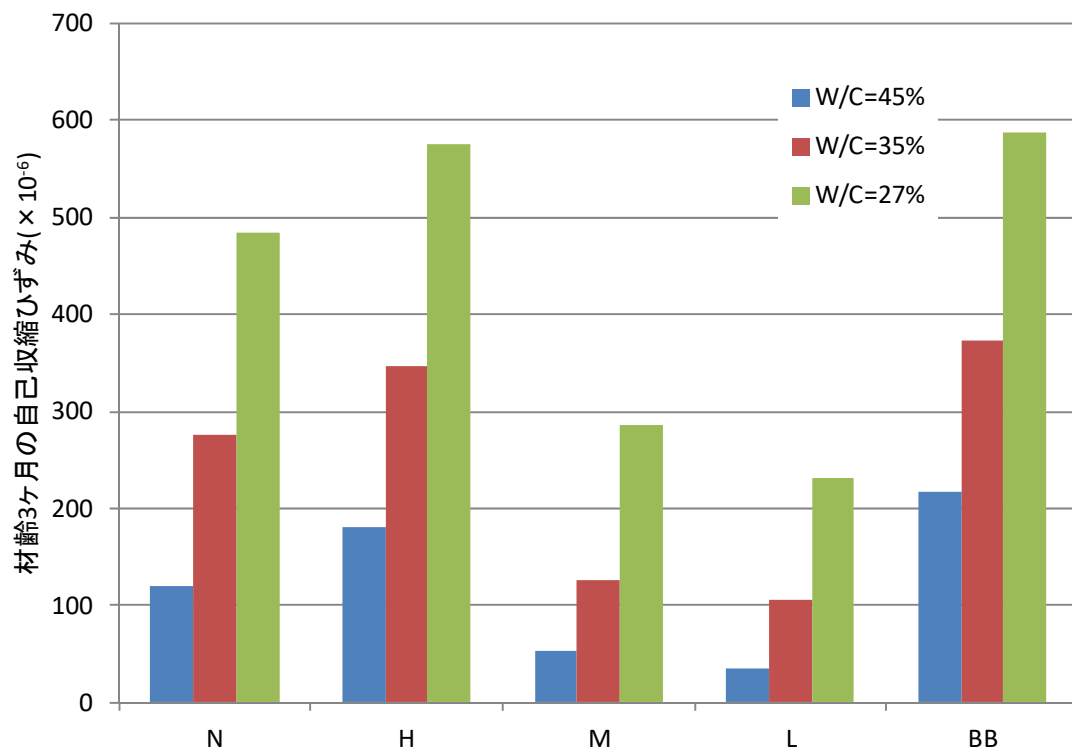


図 7.2-1 セメント種類ごとのコンクリートの自己収縮ひずみ

ご覧の通り、コンクリートの自己収縮ひずみは、乾燥収縮ひずみの傾向とは大きく異なり、セメント種類、水セメント比によって大きく異なります。セメント種類における自己収縮ひずみの大小関係は、**BB>H>N>M>L** となり、水セメント比が小さいほど自己収縮ひずみは大きくなります。特に、低水セメント比になると自己収縮ひずみは非常に大きくなり、このような収縮ひずみは無視できないものとなります。

8. 耐久性

8.1 凍結融解抵抗性

各セメントを使用したコンクリートの凍結融解試験結果を図 8.1-1 に示します。コンクリートの水セメント比は全て 50%となっており、主な使用材料は、細骨材として陸砂（絶乾密度:2.56g/cm³, 吸水率:1.72%）、粗骨材として砂岩碎石（絶乾密度:2.64g/cm³, 吸水率:0.55%）を使用しています。また、空気量は 4.5～5.0%とし、凍結融解試験開始の前養生期間は全てのケースにおいて材齢 28 日としています。

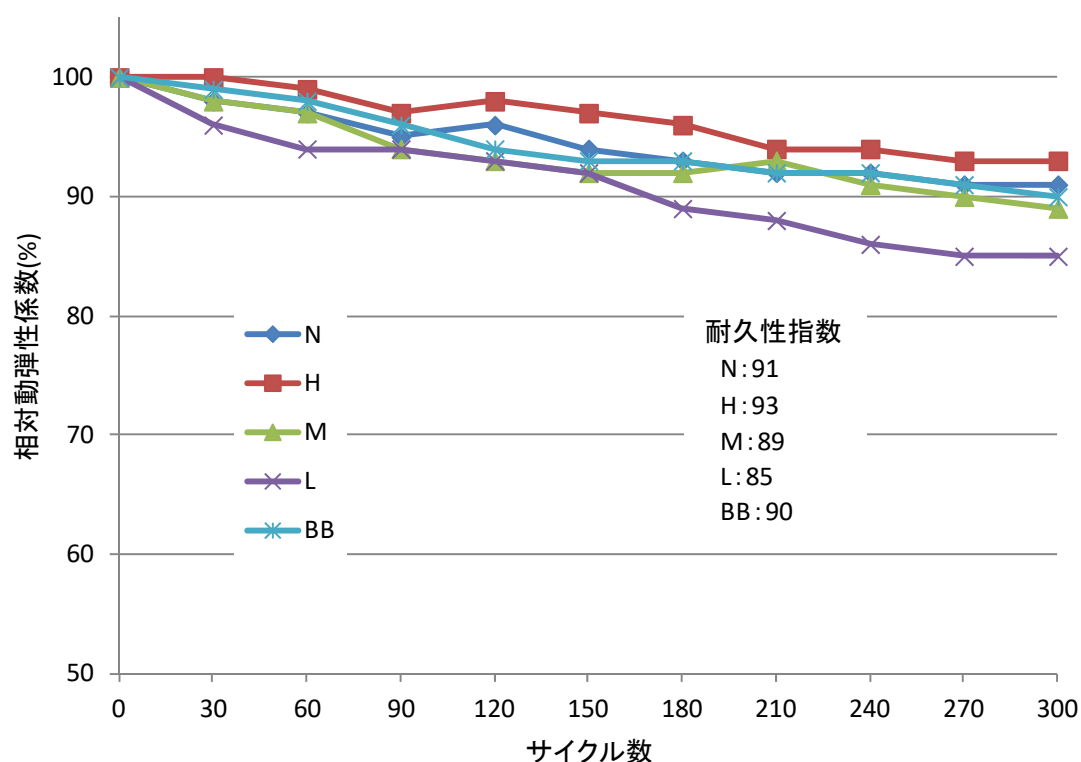


図 8.1-1 凍結融解試験結果

一般に、凍結融解試験における相対動弾性係数が大きいほど凍結融解抵抗性が高いと言われています。また、凍結融解抵抗性の評価指標として、土木学会や日本建築学会では耐久性指数 85%以上といった基準を示しており、各セメントを使用したコンクリートは、何れもこの基準を満足しています。

8.2 中性化

各セメントを使用したコンクリートの促進中性化試験結果を表 8.2-1 および図 8.2-1～図 8.2-3 に示します。

表 8.2-1 促進中性化試験結果

セメント 種類	W/C (%)	促進中性化深さ(mm)				中性化速度係数 $\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$
		4 週	8 週	13 週	26 週	
N	40	3.0	4.1	5.3	7.5	1.46
	50	7.0	8.8	11.7	16.5	3.21
	60	10.8	14.6	18.8	26.6	5.20
H	40	1.1	1.7	2.1	2.9	0.57
	50	5.8	7.4	9.8	13.8	2.69
	60	9.7	13.2	17.0	24.0	4.70
M	40	3.9	5.0	6.6	9.3	1.82
	50	8.8	11.2	14.8	20.9	4.07
	60	13.8	18.2	23.8	33.6	6.56
L	40	4.0	5.6	7.2	10.1	1.99
	50	9.5	12.4	16.2	23.0	4.48
	60	15.8	22.2	28.3	40.0	7.84
BB	40	4.2	5.9	7.5	10.6	2.08
	50	9.2	12.6	16.2	23.0	4.49
	60	14.2	19.4	25.0	35.3	6.91

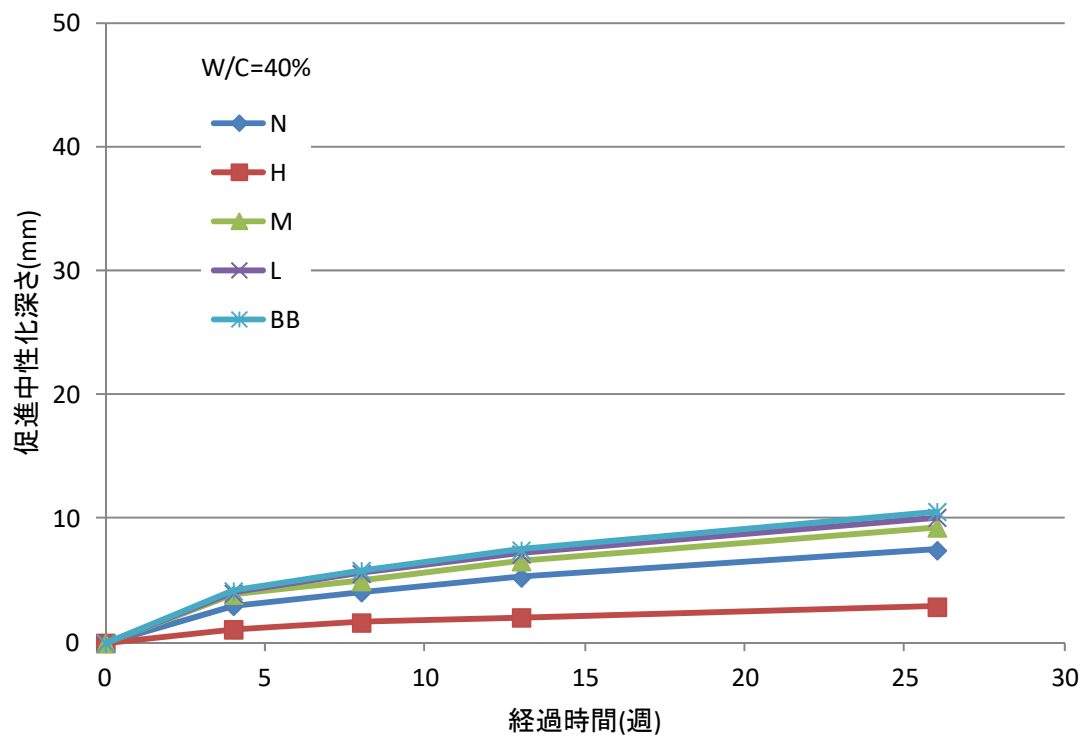


図 8.2-1 促進中性化試験結果 (W/C=40%)

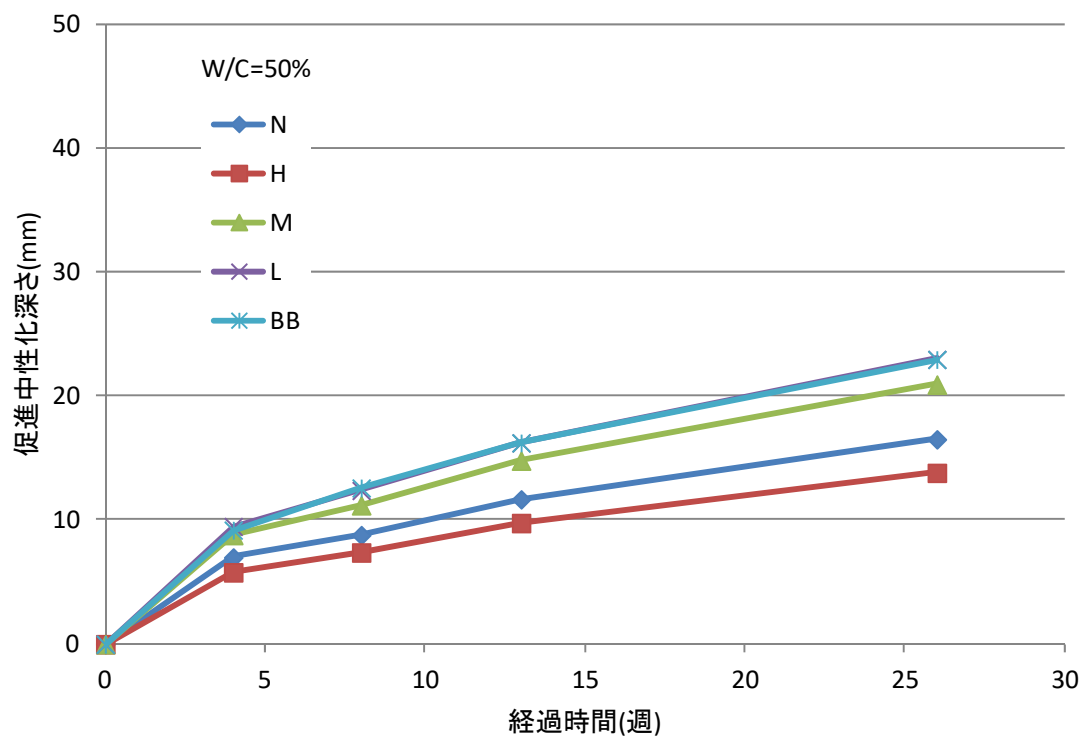


図 8.2-2 促進中性化試験結果 (W/C=50%)

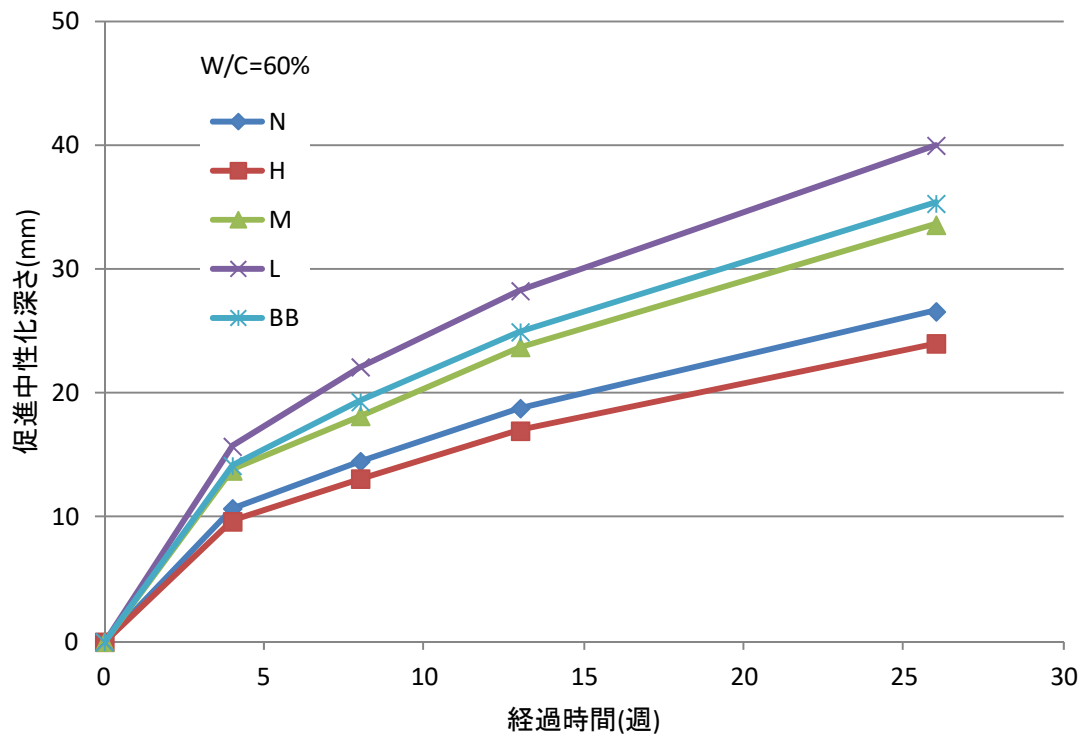


図 8.2-3 促進中性化試験結果 (W/C=60%)

表 8.2-1, 図 8.2-1～図 8.2-3 から, 水セメント比が高いほど, もしくは, 低発熱タイプのセメントや混合セメントになると中性化の進行が速くなることが分かります. つまり, 中性化の進行を抑制する場合には, 水セメント比や使用セメントの選定が重要となります.

8.3 塩分浸透性

各セメントを使用した水セメント比 50%のコンクリートの塩分浸透深さを表 8.3-1 および図 8.3-1 に示します。

塩分浸透性は、中性化の傾向と異なり、混合セメントである BB が最も塩分浸透に対する抵抗性を有しています。また、中性化の抑制に有効であった H は、塩分浸透抵抗性が低いことに留意が必要です。

表 8.3-1 塩分浸透深さ

セメント種類	W/C (%)	塩分浸透深さ(mm)			
		4 週	8 週	13 週	26 週
N	50	8.0	10.4	11.0	12.4
H		10.4	13.4	15.3	17.6
M		12.0	15.4	17.0	18.9
L		11.9	15.2	16.3	18.3
BB		5.1	7.7	9.1	9.8

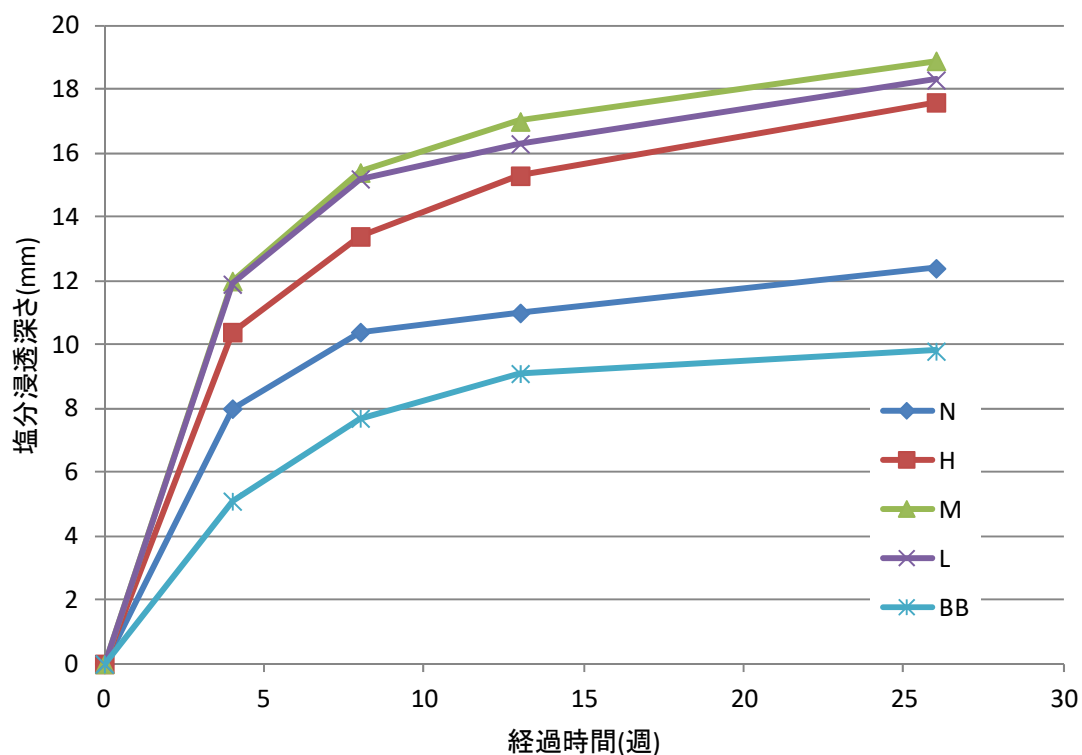


図 8.3-1 塩分浸透深さ

9. 高強度コンクリートの物性

普通ポルトランドセメント (N)，中庸熱ポルトランドセメント (M)，低熱ポルトランドセメント (L)，高炉セメント B 種 (BB) を使用した高強度コンクリートの基礎的な性状について以下に示します。なお，高強度コンクリートとしての適用範囲は， $25\% \leq W/C \leq 40\%$ です。

9.1 水セメント比と高性能 AE 減水剤添加量の関係

単位水量 170kg/m^3 ，スランプフロー $650 \pm 10\text{mm}$ の条件で実施した高強度コンクリートの水セメント比と $W/C=30\%$ の N を基準とした高性能 AE 減水剤添加量の割合の関係を図 9.1-1 に示します。

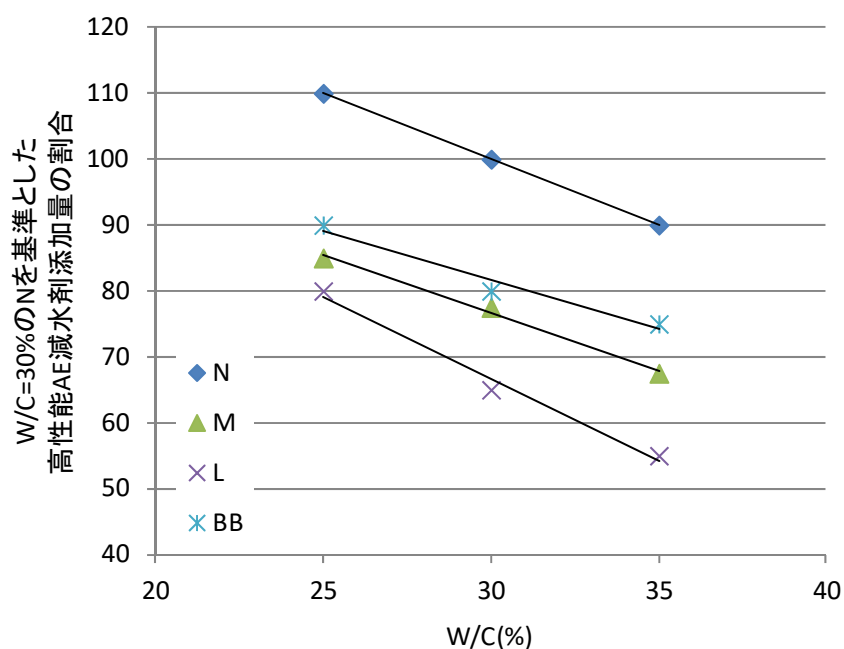


図 9.1-1 W/C と高性能 AE 減水剤添加量の割合の関係

9.2 強度試験結果の一例

高強度コンクリートの圧縮強度、割裂引張強度、ヤング係数の測定結果を表 9.2-1 に示します。

表 9.2-1 強度試験結果一覧

セメント 種類	練上がり 養生温度 (℃)	W/C (%)	上段：圧縮強度(N/mm ²), 中段：割裂引張強度(N/mm ²), 下段：ヤング係数(kN/mm ²)			
			7 日	28 日	56 日	91 日
N	20	25	104	110	---	---
			6.11	6.40	---	---
			41.4	42.5	---	---
		35	69.9	81.6	---	---
			4.76	5.20	---	---
			36.8	38.8	---	---
		40	59.3	70.9	---	---
			4.31	4.71	---	---
			35.2	37.1	---	---
M		25	89.0	115	120	123
			5.26	6.36	6.76	6.88
			39.5	43.6	44.3	45.2
		35	51.4	77.3	84.4	89.2
			3.83	5.03	5.27	5.47
			33.3	38.5	39.9	40.0
		40	39.6	65.0	73.5	78.9
			3.31	4.61	4.81	5.03
			30.7	36.8	37.8	38.7
L		25	65.4	105	115	122
			4.26	5.92	6.24	6.54
			36.3	42.2	43.1	44.7
		35	39.2	71.2	85.4	90.3
			2.94	4.49	5.19	5.37
			27.8	35.8	39.7	40.8
		40	22.9	52.7	75.5	80.3
			2.11	3.48	4.82	4.98
			22.3	29.2	38.3	39.3
BB	25	79.3	118	---	---	
		5.16	6.53	---	---	
		39.9	45.0	---	---	
	35	46.8	74.7	---	---	
		3.73	4.97	---	---	
		33.3	38.7	---	---	
	40	36.1	61.2	---	---	
		3.29	4.41	---	---	
		30.1	36.2	---	---	

9.3 セメント水比と圧縮強度の関係

高強度コンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係は、表 5.2-1 に示した一般強度レベル（ $40\% \leq W/C \leq 60\%$ ）のものと異なります。そこで、高強度レベル（ $25\% \leq W/C \leq 40\%$ ）におけるセメント水比と圧縮強度の関係を表 9.3-1 に示します。

表 9.3-1 高強度コンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係

セメント種類	練上がり 養生温度 (℃)	材齢 (日)	Fc=A+B(C/W)	
			A	B
N	20	7	-15.2	29.8
		28	7.12	25.8
M		7	-42.7	32.9
		28	-17.9	33.2
		56	-4.17	31.0
		91	5.20	29.4
L		7	-41.8	27.0
		28	-28.4	33.6
		56	10.2	26.2
		91	10.9	27.8
BB		7	-35.5	28.7
		28	-33.5	37.9

9.4 圧縮強度と割裂引張強度およびヤング係数との関係

高強度コンクリートについて、圧縮強度と割裂引張強度の関係を図 9.4-1、圧縮強度とヤング係数の関係を図 9.4-2 に示します。

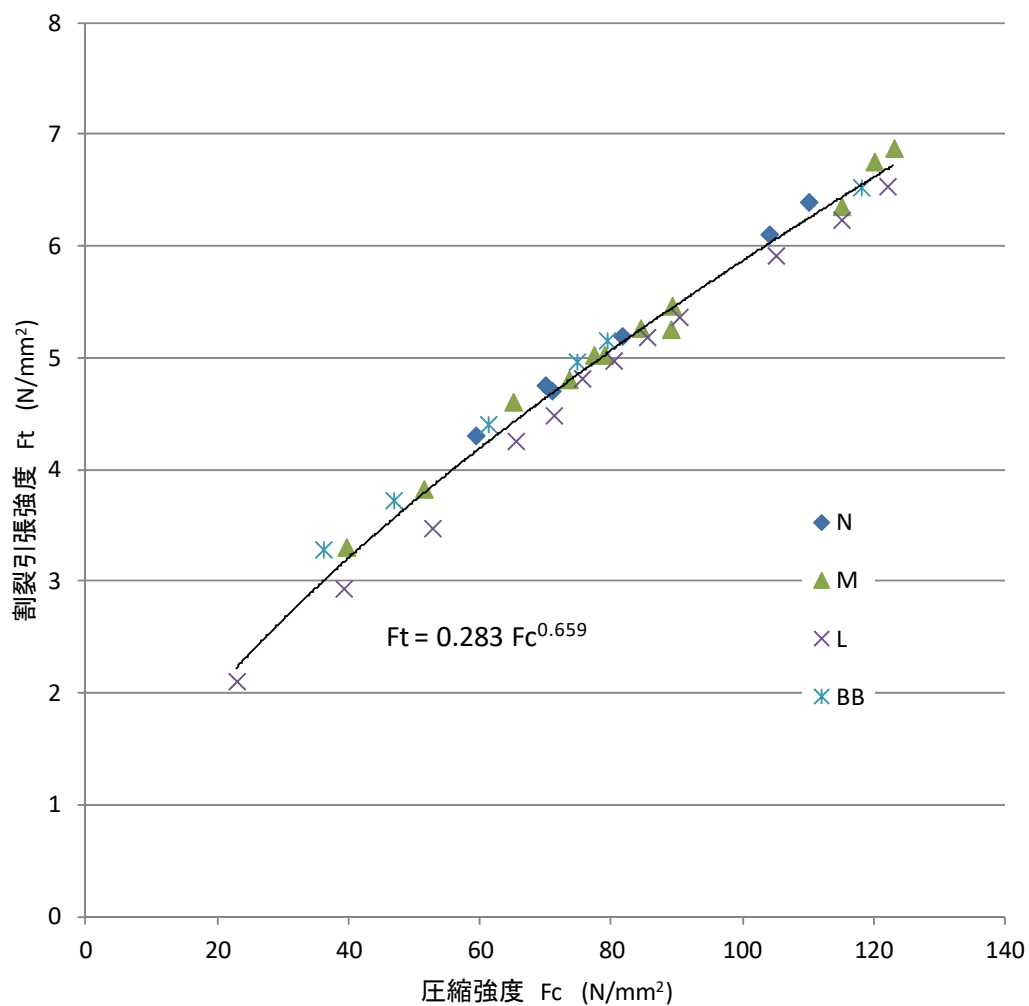


図 9.4-1 圧縮強度と割裂引張強度の関係

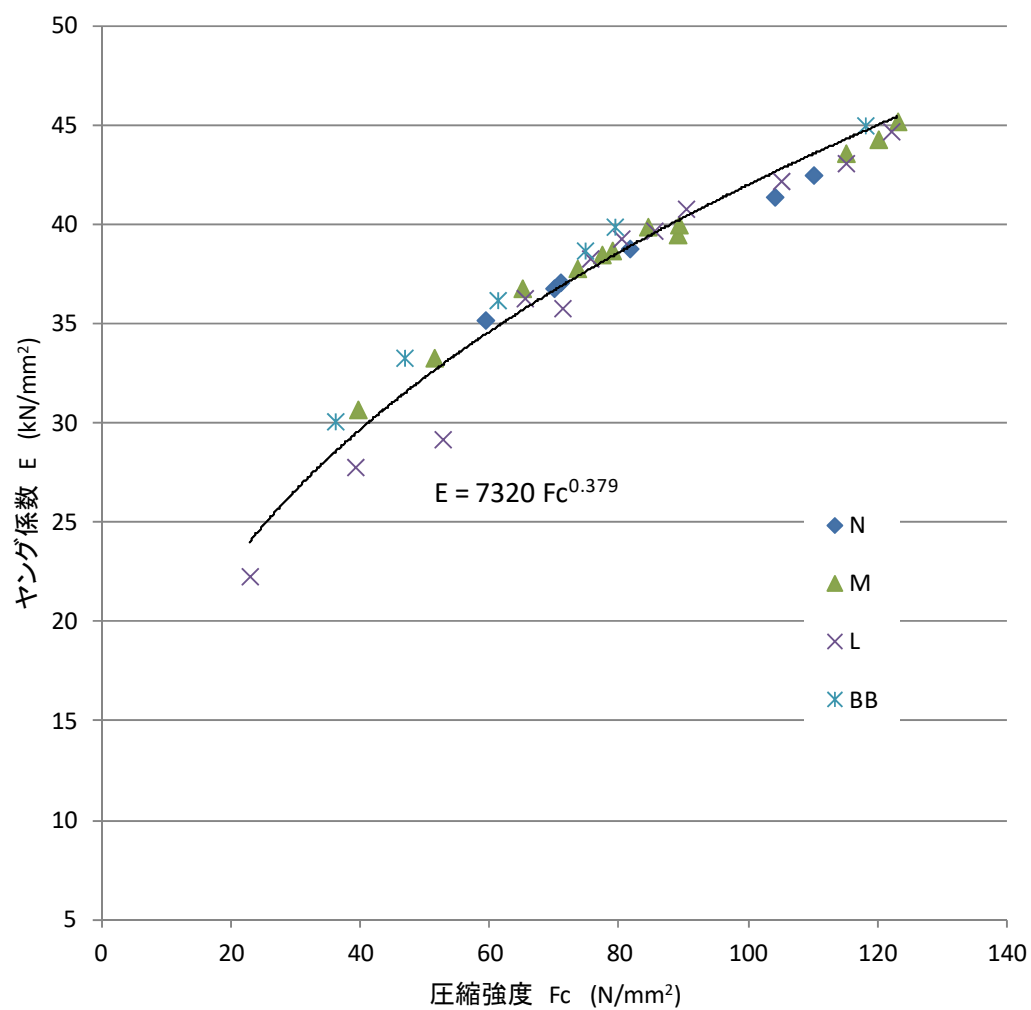


図 9.4-2 圧縮強度とヤング係数の関係

9.5 断熱温度上昇特性

高強度コンクリートをマスコンクリートに適用する事例は少ないため、発熱について配慮する必要はないと思われます。しかし、比較的大断面となるような柱部材に高強度コンクリートを使用する事例が増え、発熱への配慮から、当該コンクリートに中庸熱ポルトランドセメント (M)、低熱ポルトランドセメント (L) を使用することが多くなっています。そこで、上記のセメントについて断熱温度上昇特性を整理しました (表 9.5-1 参照)。

表 9.5-1 断熱温度上昇曲線

セメント種類	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	$Q(t)=Q_{\infty}\{1-\exp(-\beta t)^{\gamma}\}$		
			Q_{∞}	β	γ
M	500	10	58.0	0.467	1.476
		20	58.5	1.010	1.318
		30	58.3	1.840	1.261
	550	10	61.9	0.546	1.642
		20	62.2	1.265	1.504
		30	62.0	2.624	1.521
	600	10	63.2	0.630	1.805
		20	63.4	1.585	1.688
		30	63.1	3.921	1.808
	650	10	64.0	0.737	1.993
		20	64.1	2.068	1.903
		30	63.8	6.314	2.143
L	500	10	49.9	0.409	1.126
		20	50.8	0.758	0.967
		30	51.0	1.125	0.881
	550	10	53.6	0.458	1.224
		20	54.3	0.883	1.069
		30	54.4	1.348	0.997
	600	10	55.3	0.508	1.321
		20	55.8	1.015	1.187
		30	55.8	1.634	1.132
	650	10	56.5	0.562	1.448
		20	57.0	1.189	1.334
		30	56.8	2.041	1.293

10. コンクリートの主要物性一覧

本技術資料に記載したコンクリートの主要物性について表 10-1～表 10-8 に示します。

表 10-1 セメント水比と圧縮強度の関係

セメント種類	練上がり養生温度 (℃)	材齢 (日)	W/C (%)	Fc=A+B(C/W)	
				A	B
N	20	7	25～40	-15.2	29.8
			40～60	-22.6	27.1
		28	25～40	7.12	25.8
			40～60	-14.6	29.4
H		3	40～60	-17.8	25.6
		7	40～60	-9.82	25.5
		28	40～60	-3.64	27.4
M		28	25～40	-17.9	33.2
			40～60	-16.2	28.6
		56	25～40	-4.17	31.0
			40～60	-3.53	28.2
		91	25～40	5.20	29.4
			40～60	2.39	26.9
L		28	25～40	-28.4	33.6
			40～60	-28.9	30.6
		56	25～40	10.2	26.2
			40～60	-11.5	30.0
		91	25～40	10.9	27.8
			40～60	-13.0	33.9
BB		7	25～40	-35.5	28.7
	40～60		-14.0	18.2	
	28	25～40	-33.5	37.9	
		40～60	-13.3	27.1	

表 10-2 圧縮強度発現式

セメント 種類	W/C (%)	材齢式 ※環境温度 20℃			有効材齢式			積算温度式	
		$F_c(t) = \frac{t}{a+bt} \cdot F_c(t_0)$			$F_c(t_c) = \frac{t_c}{a'+b't_c} \cdot F_c(t_0)$			$F_c(M) = c + d \cdot \log M$	
		a	b	Fc(t ₀)	a'	b'	Fc(t ₀)	c	d
N	40	3.58	1.01	69.4	3.63	1.07	69.4	-17.2	24.5
	50	4.36	0.98	53.1	4.47	1.04	53.1	-18.0	20.4
	60	5.35	0.96	39.1	5.42	1.00	39.1	-16.5	16.2
H	40	1.29	0.97	64.5	1.51	1.00	64.5	-8.56	25.3
	50	1.93	0.94	52.0	2.04	1.01	52.0	-13.2	22.0
	60	2.21	0.93	41.5	2.38	0.97	41.5	-13.9	18.9
M	40	9.11	0.90	68.7	9.55	0.91	68.7	-46.9 (0≦M≦420) -35.7(420≦M)	34.2 (0≦M≦420) 30.6 (420≦M)
	50	14.4	0.84	58.6	15.4	0.88	58.6	-32.3 (0≦M≦420) -55.8 (420≦M)	22.9 (0≦M≦420) 33.0 (420≦M)
	60	19.1	0.77	45.8	18.1	0.82	45.8	-26.8 (0≦M≦420) -52.0 (420≦M)	17.8 (0≦M≦420) 28.5 (420≦M)
L	40	20.0	0.78	71.4	20.6	0.83	71.4	-29.9 (0≦M≦420) -90.0 (420≦M)	21.6 (0≦M≦420) 46.5 (420≦M)
	50	28.0	0.67	56.0	29.8	0.70	56.0	-17.5 (0≦M≦420) -107 (420≦M)	12.5 (0≦M≦420) 47.6 (420≦M)
	60	37.6	0.56	42.9	34.2	0.63	42.9	-11.7 (0≦M≦420) -101 (420≦M)	8.26 (0≦M≦420) 42.7 (420≦M)
BB	40	7.96	0.91	67.1	8.51	0.98	67.1	-38.3	30.2
	50	10.3	0.92	53.1	9.95	0.97	53.1	-34.1	24.8
	60	11.3	0.87	42.0	10.0	0.89	42.0	-30.2	21.4

※参考表 3-2 中の t₀ は H のケースで 28 日、それ以外のケースでは 91 日

表 10-3 圧縮強度と割裂引張強度，圧縮強度とヤング係数の関係

コンクリート 種類	W/C (%)	圧縮強度と割裂引張強度の関係		圧縮強度とヤング係数の関係	
		$F_t = e \cdot F_c^f$		$E = g \cdot F_c^h$	
		e	f	g	h
普通	40～60	0.236	0.677	8340	0.348
高強度	25～40	0.283	0.659	7320	0.379

表 10-4 断熱温度上昇特性（普通コンクリートレベル）

セメント 種類	$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-\beta t^{\gamma})\}$	単位セメント量 W_c の範囲：250kg/m ³ ≤ W_c ≤ 400kg/m ³	
N	$Q_{\infty} = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 6.20424 + 0.14303W_c$	$B = -0.09920 + 0.00001211W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -0.34136 + 0.00060177W_c$	$D = 0.03735 + 0.00007269W_c$
H	$Q_{\infty} = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 13.7493 + 0.14140194W_c$	$B = -0.11516 - 0.00014625W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -0.21864 + 0.00003349W_c$	$D = 0.05202 + 0.00012276W_c$
M	$Q_{\infty} = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 2.32748 + 0.1264092W_c$	$B = 0.20298 - 0.00050896W_c$
	$\beta = C + D \cdot T_{ini}$	$C = 0.20558 - 0.0008386W_c$	$D = 0.00147 + 0.00011483W_c$
	$\gamma = E + F \cdot T_{ini}$	$E = 1.17577 + 0.0005708W_c$	$F = -0.02576 + 0.00003239W_c$
L	$Q_{\infty} = A + B \cdot T_{ini}$	$A = -6.08172 + 0.12626877W_c$	$B = 0.56622 - 0.00124891W_c$
	$\beta = C + D \cdot T_{ini}$	$C = 0.37284 - 0.00080651W_c$	$D = -0.00457 + 0.00008304W_c$
	$\gamma = E + F \cdot T_{ini}$	$E = 1.07751 + 0.00003247W_c$	$F = -0.0234 + 0.00002954W_c$
BB	$Q_{\infty} = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 17.3751 + 0.1145569W_c$	$B = -0.15421 + 0.00023971W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -0.2382 + 0.00017378W_c$	$D = 0.02347 + 0.00009596W_c$

※ T_{ini} ：打込み温度(℃)

表 10-5 断熱温度上昇特性（高強度コンクリートレベル）

セメント 種類	$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-\beta t^{\gamma})\}$	単位セメント量 W_c の範囲：400kg/m ³ ≤ W_c ≤ 500(450*)kg/m ³	
N	$Q_{\infty} = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 38.9102 + 0.06077966W_c$	$B = -0.10780 + 0.00003559W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -0.82544 + 0.00181554W_c$	$D = 0.06568 + 0.00000114W_c$
H	$Q_{\infty} = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 54.3277 + 0.03919774W_c$	$B = -0.50678 + 0.00083729W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -3.3804 + 0.00791571W_c$	$D = 0.23472 - 0.00033315W_c$
M	$Q_{\infty} = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 31.6249 + 0.05268362W_c$	$B = -0.07017 + 0.00017034W_c$
	$\beta = C + D \cdot T_{ini}$	$C = 0.39789 - 0.00133045W_c$	$D = -0.03533 + 0.00020796W_c$
	$\gamma = E + F \cdot T_{ini}$	$E = 0.77588 + 0.00158158W_c$	$F = -0.02095 + 0.00002040W_c$
L	$Q_{\infty} = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 23.6418 + 0.05164972W_c$	$B = 0.09017 - 0.00007034W_c$
	$\beta = C + D \cdot T_{ini}$	$C = 0.05342 - 0.00001085W_c$	$D = 0.00131 + 0.00006898W_c$
	$\gamma = E + F \cdot T_{ini}$	$E = 0.52704 + 0.00141859W_c$	$F = -0.00915 - 0.00000619W_c$
BB	$Q_{\infty} = A + B \cdot T_{ini}$	$A = 53.0627 + 0.02447458W_c$	$B = -0.14475 + 0.00021949W_c$
	$\alpha = C + D \cdot T_{ini}$	$C = -0.9701 + 0.00200486W_c$	$D = 0.04468 + 0.00004283W_c$

※ T_{ini} ：打込み温度(℃)，*：H のケースは $W_c = 450\text{kg/m}^3$ が上限

表 10-6 乾燥収縮ひずみ

セメント 種類	W/C (%)	乾燥収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)				
		7 日	28 日	56 日	91 日	182 日
N	50	185	422	562	650	746
H		163	403	542	625	701
M		198	422	554	631	724
L		199	445	545	622	717
BB		190	443	587	686	768

※単位水量：170kg/m³，使用骨材：細骨材 陸砂，粗骨材 砂岩砕石

表 10-7 自己収縮ひずみ

セメント 種類	W/C (%)	自己収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)				
		3 日	7 日	28 日	56 日	91 日
N	27	298	328	407	446	485
	35	171	188	232	254	276
	45	54	64	90	108	120
H	27	328	362	483	546	575
	35	188	210	280	322	346
	45	88	93	131	157	181
M	27	151	171	222	265	285
	35	66	69	99	118	126
	45	3	9	50	52	53
L	27	51	77	168	220	232
	35	23	36	88	100	105
	45	1	2	33	33	35
BB	27	379	454	534	567	587
	35	263	313	367	369	372
	45	110	148	183	203	218

※使用骨材：細骨材 陸砂，粗骨材 砂岩碎石

表 10-8 促進中性化深さおよび中性化速度係数

セメント 種類	W/C (%)	促進中性化深さ(mm)				中性化速度係数 mm/√週
		4 週	8 週	13 週	26 週	
N	40	3.0	4.1	5.3	7.5	1.46
	50	7.0	8.8	11.7	16.5	3.21
	60	10.8	14.6	18.8	26.6	5.20
H	40	1.1	1.7	2.1	2.9	0.57
	50	5.8	7.4	9.8	13.8	2.69
	60	9.7	13.2	17.0	24.0	4.70
M	40	3.9	5.0	6.6	9.3	1.82
	50	8.8	11.2	14.8	20.9	4.07
	60	13.8	18.2	23.8	33.6	6.56
L	40	4.0	5.6	7.2	10.1	1.99
	50	9.5	12.4	16.2	23.0	4.48
	60	15.8	22.2	28.3	40.0	7.84
BB	40	4.2	5.9	7.5	10.6	2.08
	50	9.2	12.6	16.2	23.0	4.49
	60	14.2	19.4	25.0	35.3	6.91

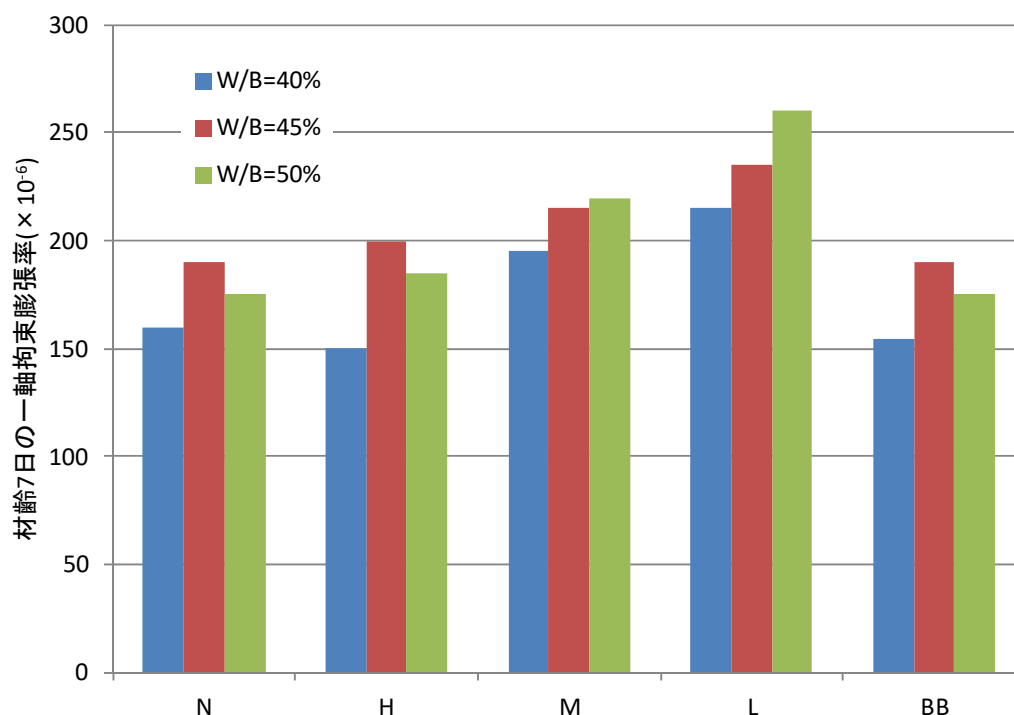
〔参考資料〕

1. 各種セメントを使用した膨張コンクリートの特性

ここでは、各セメントを使用した膨張コンクリートの特性について示します。なお、ここで使用した膨張材は、弊社製品である高性能膨張材「スーパーサクス Type-S」です。

1.1 標準使用量での一軸拘束膨張率

各セメントを使用したコンクリートの水結合材比を 40, 45, 50%とし、単位膨張材量を標準使用量である 20kg/m³とした場合の一軸拘束膨張率を参考図 1.1-1 に示します。

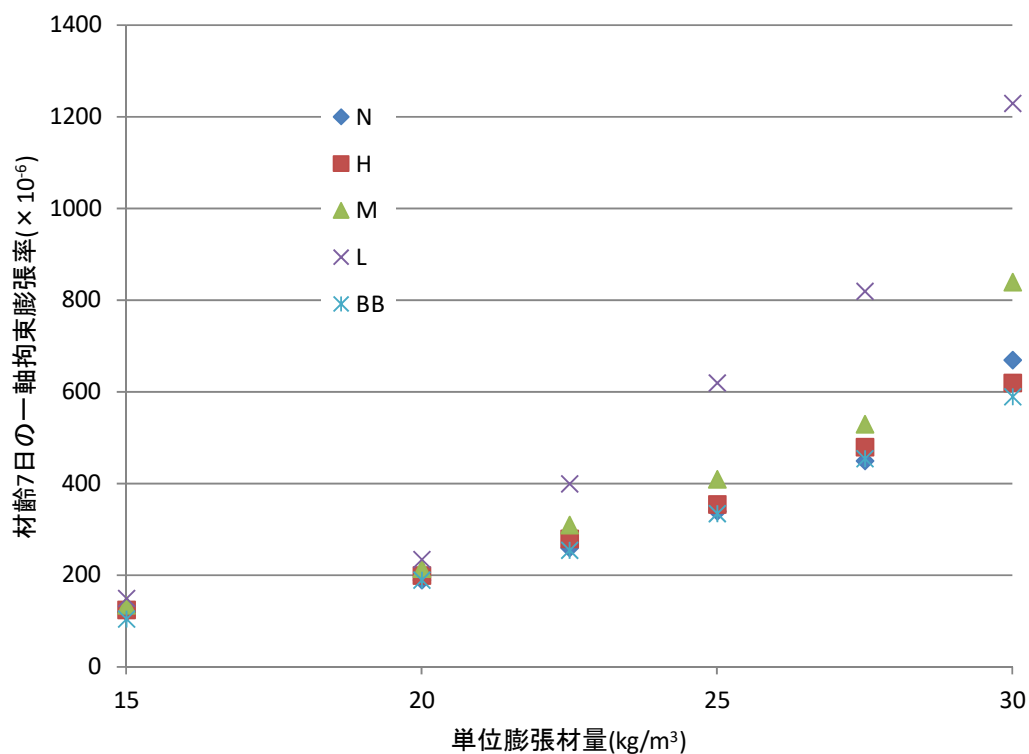


参考図 1.1-1 標準使用量での一軸拘束膨張率

参考図 1.1-1 から、セメントの種類によって一軸拘束膨張率が変化しているのが分かります。特に、M や L のように初期の強度発現が緩やかなセメントほど一軸拘束膨張率が大きくなる傾向にあります。

1.2 単位膨張材量と一軸拘束膨張率の関係

水結合材比 45%における単位膨張材量と一軸拘束膨張率の関係を参考図 1.2-1 に示します。



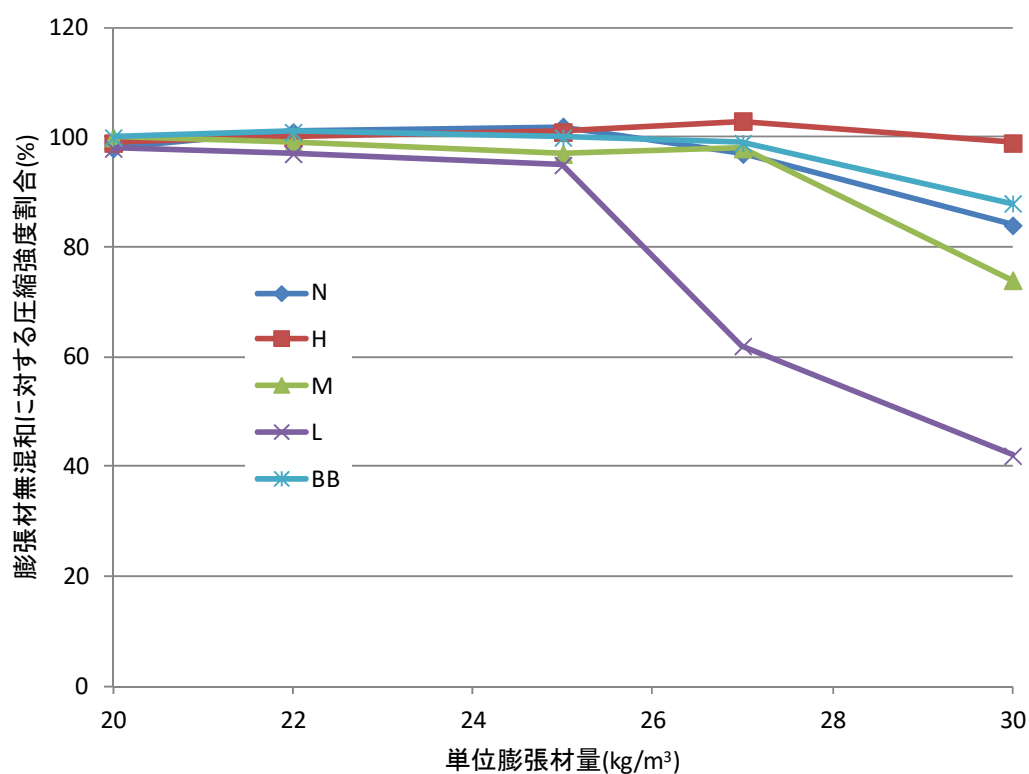
参考図 1.2-1 単位膨張材量と一軸拘束膨張率の関係

膨張材の標準使用量での一軸拘束膨張率（参考図 1.2-1）で示したように、一軸拘束膨張率は、MやLのように強度発現が緩やかなセメントほど大きくなる傾向がありました。参考図 1.2-1 から、単位膨張材量に応じた一軸拘束膨張率の増加割合は、同じく強度発現が緩やかな M や L の場合に大きくなります。特に、L のケースについては、膨張材の標準使用量である 20kg/m³を超えたあたりから、急激に一軸拘束膨張率が大きくなることに注意が必要です。

1.3 単位膨張材量ごとの圧縮強度の変化

コンクリートに過度な膨張ひずみが生じた場合、硬化体組織が膨張破壊を起こし、強度が著しく低下する原因となります。参考図 1.2-1 に示した L のように、単位膨張材量の増加によって一軸拘束膨張率が急激に大きくなるようなケースでは特に注意が必要です。そこで、単位膨張材量ごとの圧縮強度の変化を纏めましたのでご覧下さい(参考図 1.3-1)。

参考図 1.3-1 から、L のケースで 25kg/m^3 、H を除くその他のケースで 27.5kg/m^3 を超えたあたりから、強度の低下傾向が認められます。これは、過度な膨張ひずみが原因で圧縮強度用供試体に何らかの損傷が生じたことによるものと考えられます。このことから単位膨張材量は、標準使用量もしくは要求品質を満たす所定量に留めることが重要です。



参考図 1.3-1 単位膨張材量ごとの圧縮強度の変化

2. 高炉スラグ微粉末やフライアッシュを使用したコンクリートの断熱温度上昇特性

近年、セメント生産時に発生する CO₂ 量の抑制を目的に高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった混和材を使用したコンクリートが注目され、低炭素型コンクリートと呼ばれています。これらコンクリートは、CO₂ 量抑制の目的のほか、コンクリート硬化時の発熱低減のために使用されることもあります。そこで、当社ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 4000 やフライアッシュ II 種を組み合わせた幾つかのケース（参考表 2-1 参照）について断熱温度上昇特性を整理しました。それら結果は参考図 2-1～図 2-30 に示す通りであり、ベースセメント、混和材置換率、ベースセメントと混和材の合算量である単位結合材量、更には打込み温度の条件から式(2-1)に示す断熱温度上昇式の Q_{∞} と α をグラフから読み取ることができます。ただし、水結合材比は 40～65%（ダムコンクリートは 50～80%）の範囲でこれらグラフを活用して下さい。

$$Q(t)=Q_{\infty}\{1-\exp(-\alpha t)\} \quad (2-1)$$

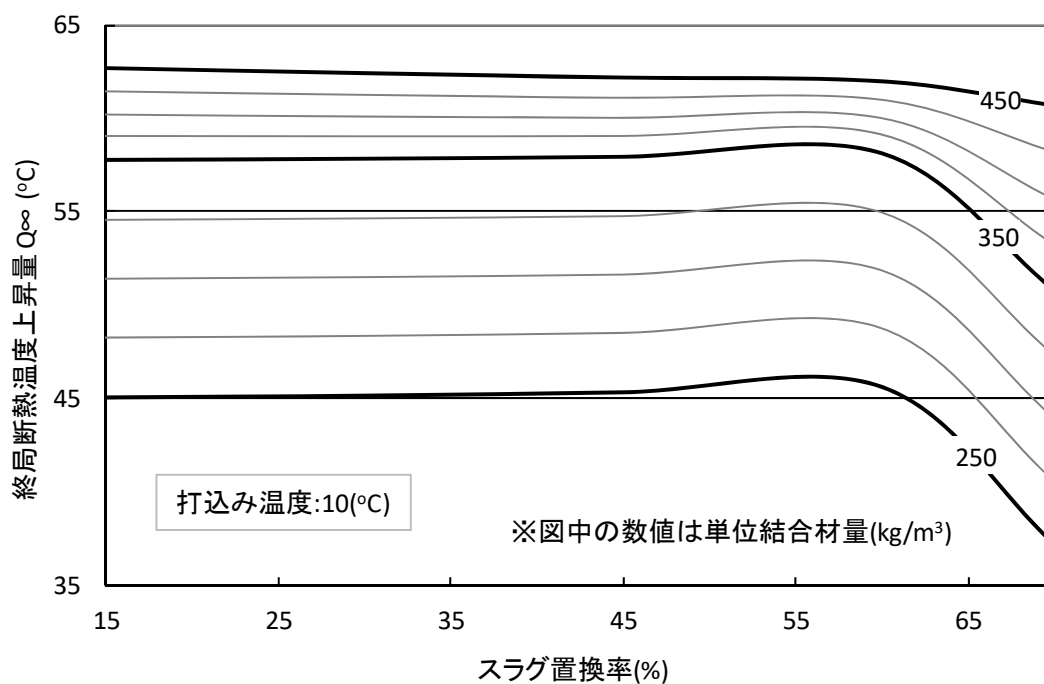
ここに、 Q_{∞} ：終局断熱温度上昇量(℃)， t ：材齢(日)， α ：実験定数

参考表 2-1 セメントと混和材の組合せ

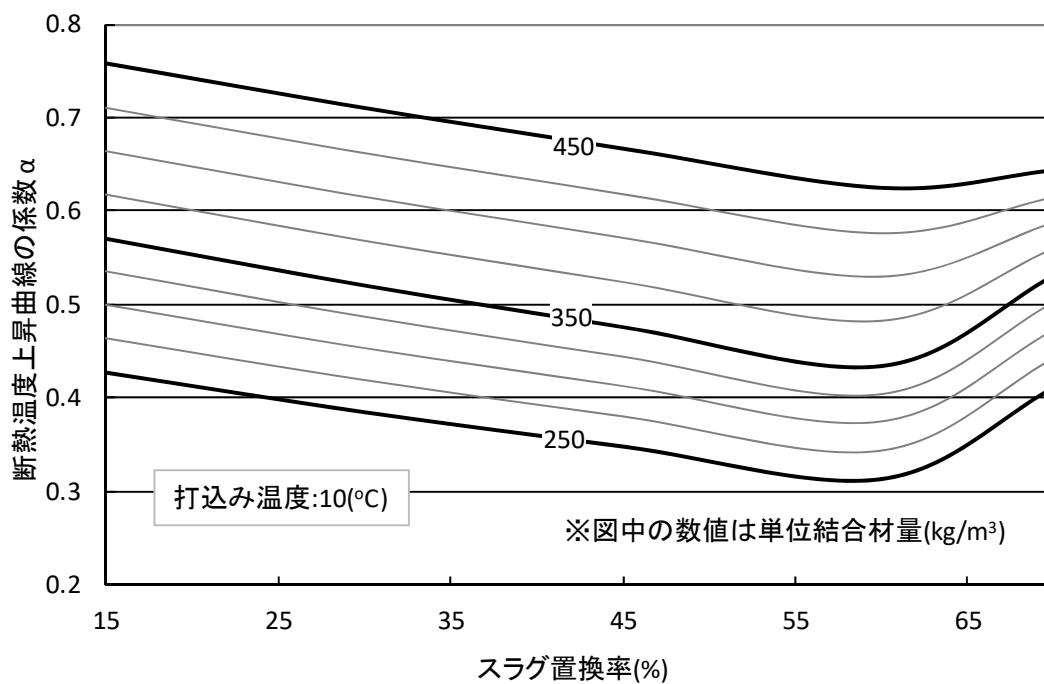
セメント 種類	混和材 種類	打込み温度 (℃)	混和材置換率 (%)	単位結合材量 (kg/m ³)	参照図
N	高炉スラグ 微粉末	10	15～70	250～450	参考図 2-1 ～参考図 2-6
		20	15～70	250～450	
		30	15～70	250～450	
N	フライ アッシュ	10	5～30	250～450	参考図 2-7 ～参考図 2-12
		20	5～30	250～450	
		30	5～30	250～450	
H	高炉スラグ 微粉末	10	30～80	250～450	参考図 2-13 ～参考図 2-18
		20	30～80	250～450	
		30	30～80	250～450	
M	フライ アッシュ	10	5～30	120*～450	参考図 2-19 ～参考図 2-24
		20	5～30	120*～450	
		30	5～30	120*～450	
L	高炉スラグ 微粉末	10	15～70	250～450	参考図 2-25 ～参考図 2-30
		20	15～70	250～450	
		30	15～70	250～450	

*：混和材置換率 20～30%においてダムコンクリートを想定した結合材量を適用

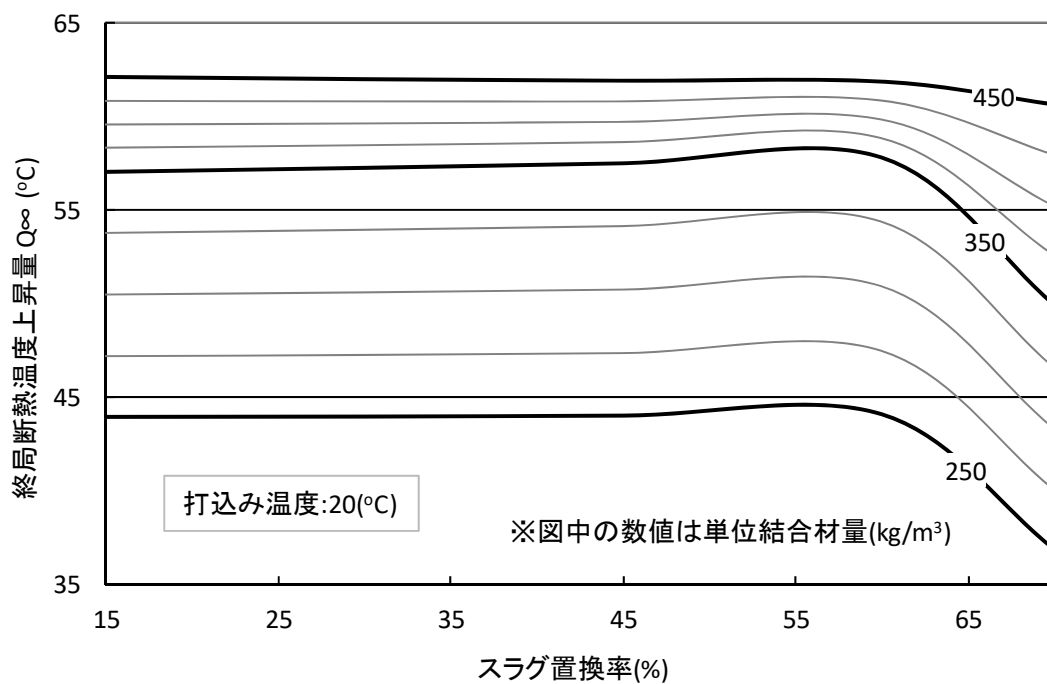
(1) 普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末のケース



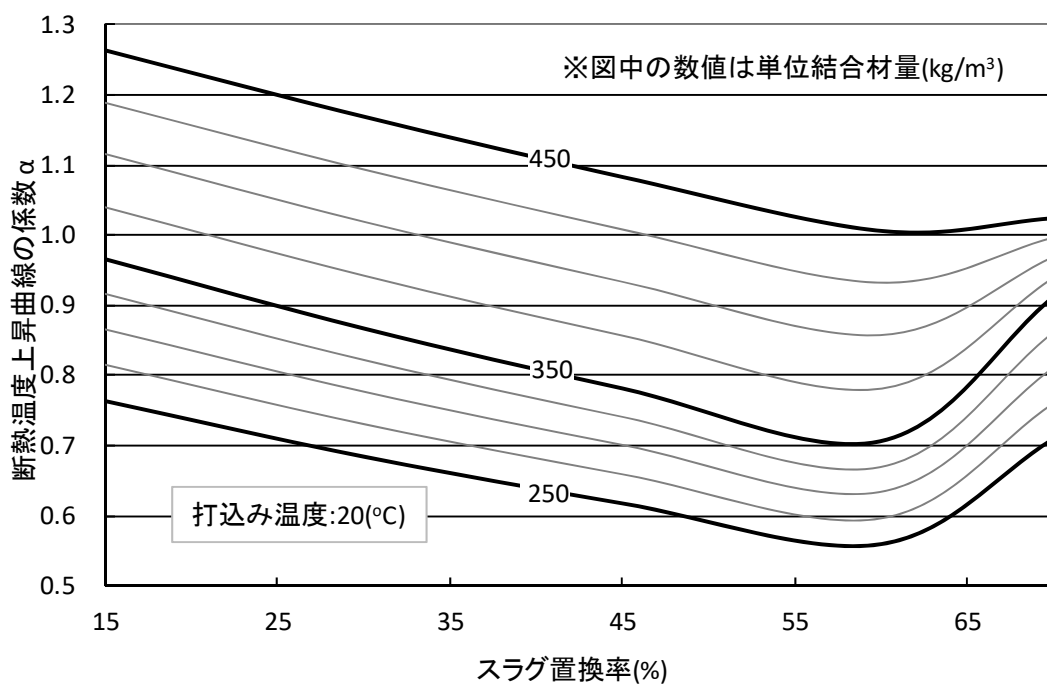
参考図 2-1 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 10°C)



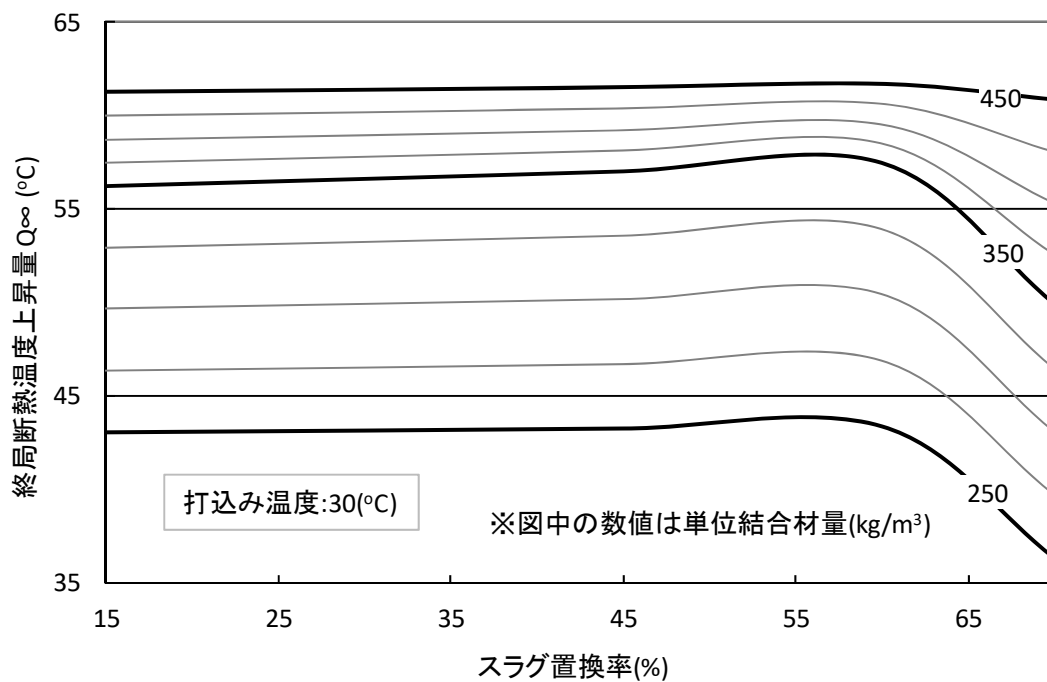
参考図 2-2 係数 α の算定図 (打込み温度 10°C)



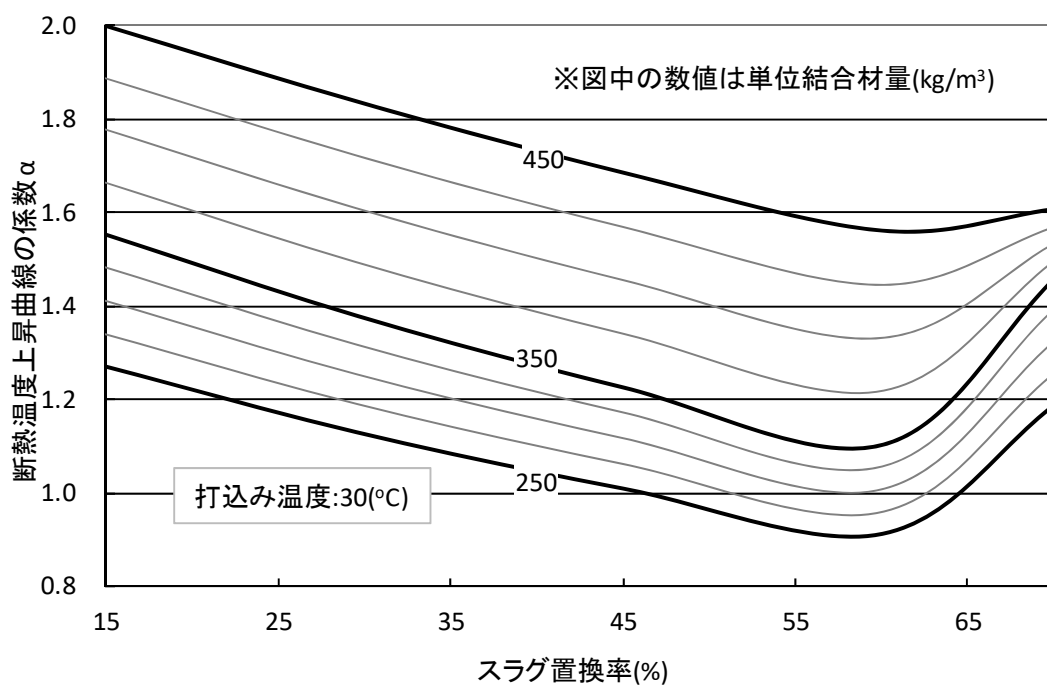
参考図 2-3 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 20°C)



参考図 2-4 係数 α の算定図 (打込み温度 20°C)

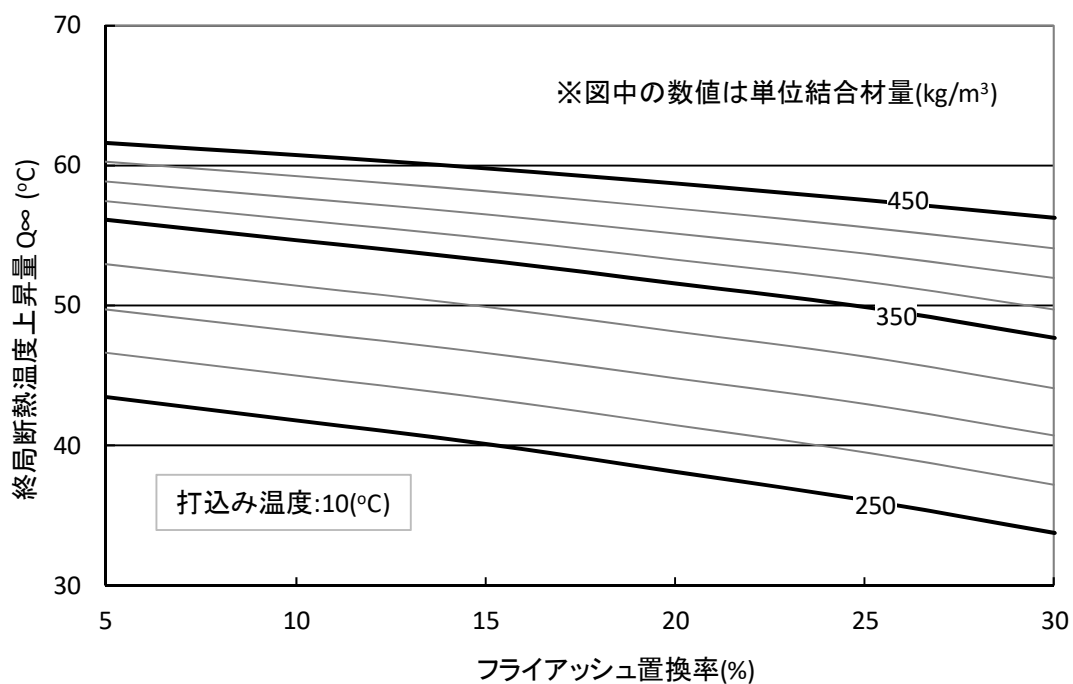


参考図 2-5 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 30°C)

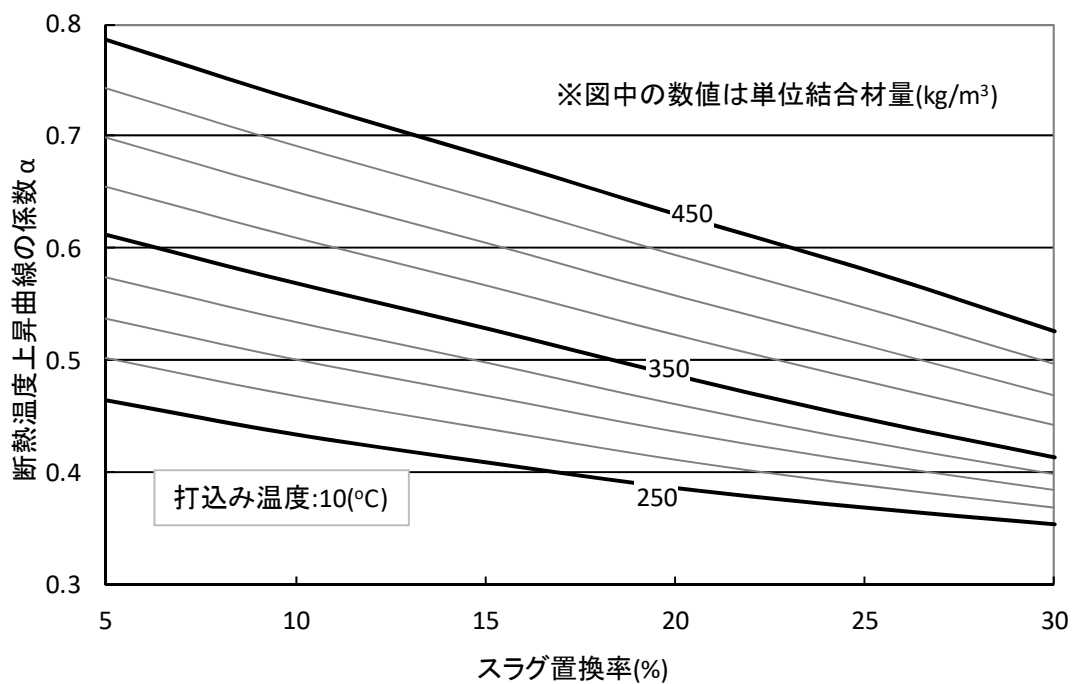


参考図 2-6 係数 α の算定図 (打込み温度 30°C)

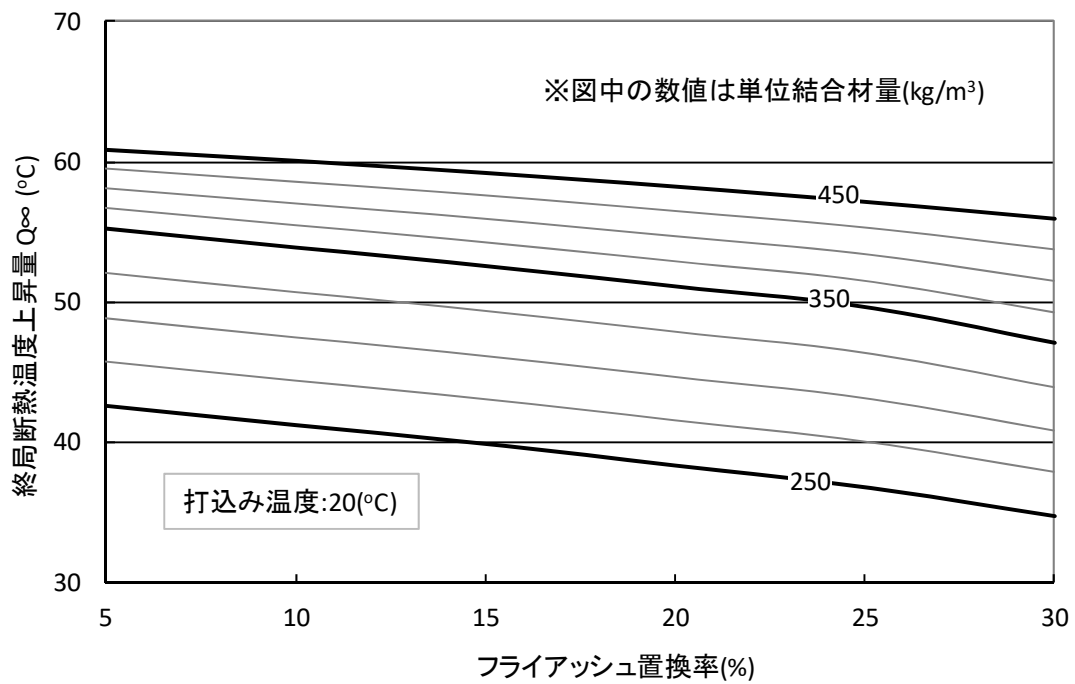
(2) 普通ポルトランドセメント+フライアッシュのケース



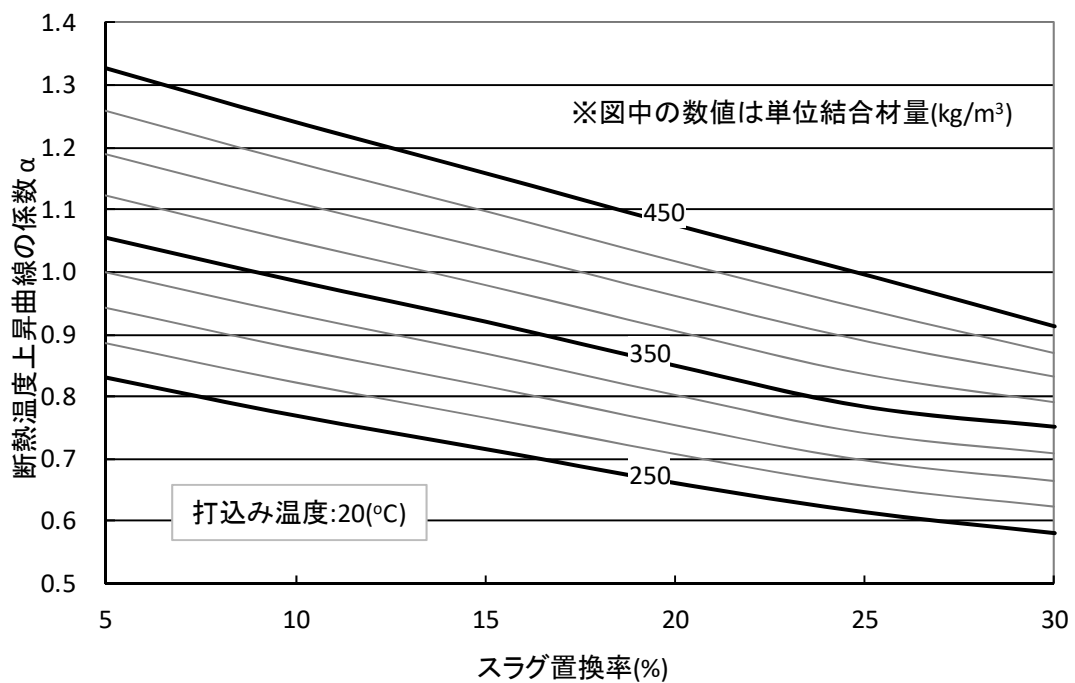
参考図 2-7 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 10°C)



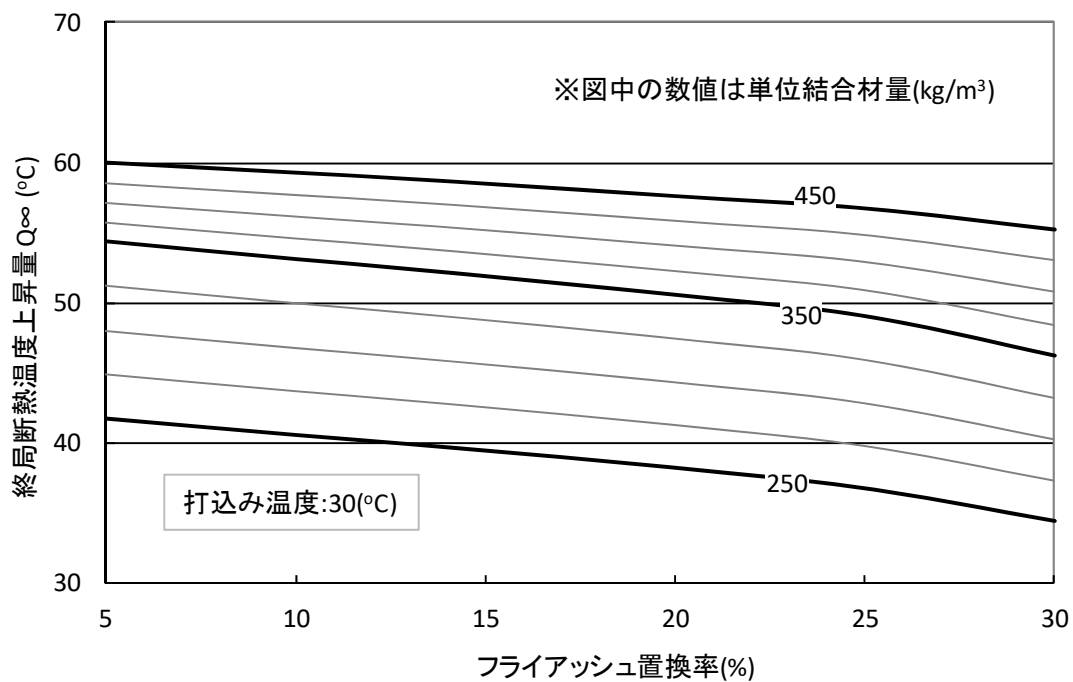
参考図 2-8 係数 α の算定図 (打込み温度 10°C)



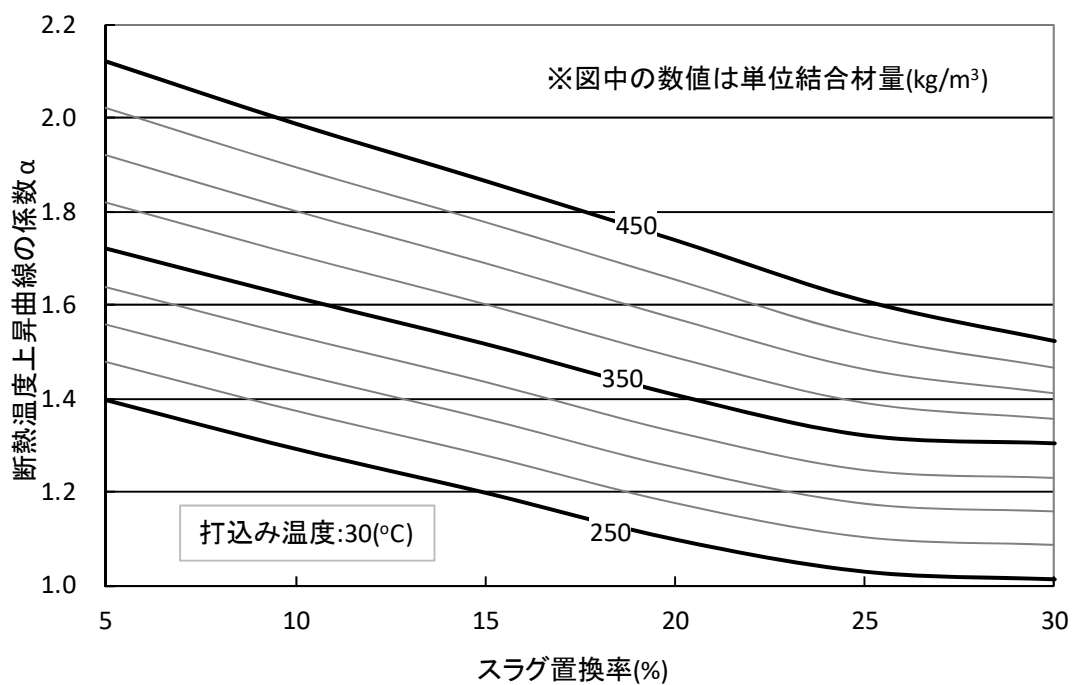
参考図 2-9 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 20°C)



参考図 2-10 係数 α の算定図 (打込み温度 20°C)

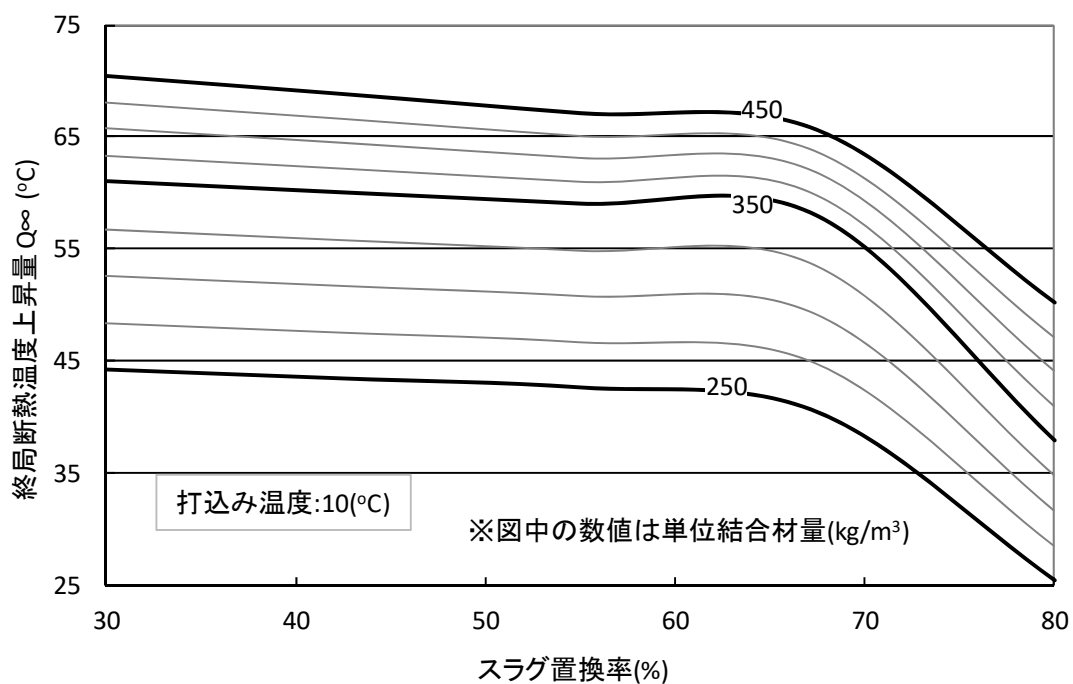


参考図 2-11 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 30°C)

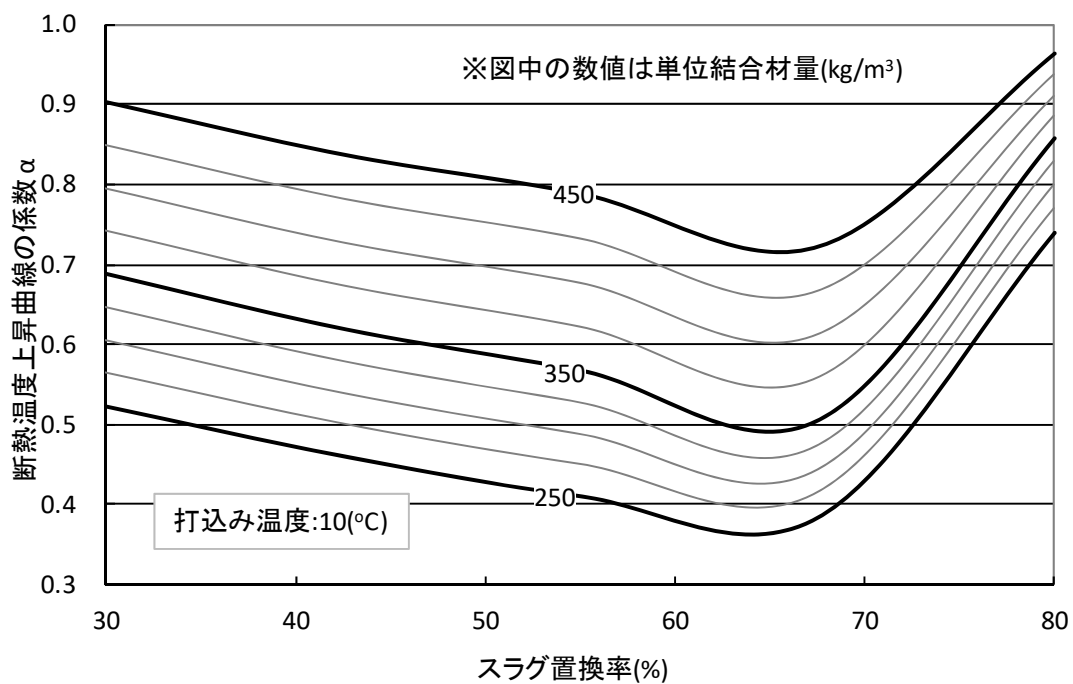


参考図 2-12 係数 α の算定図 (打込み温度 30°C)

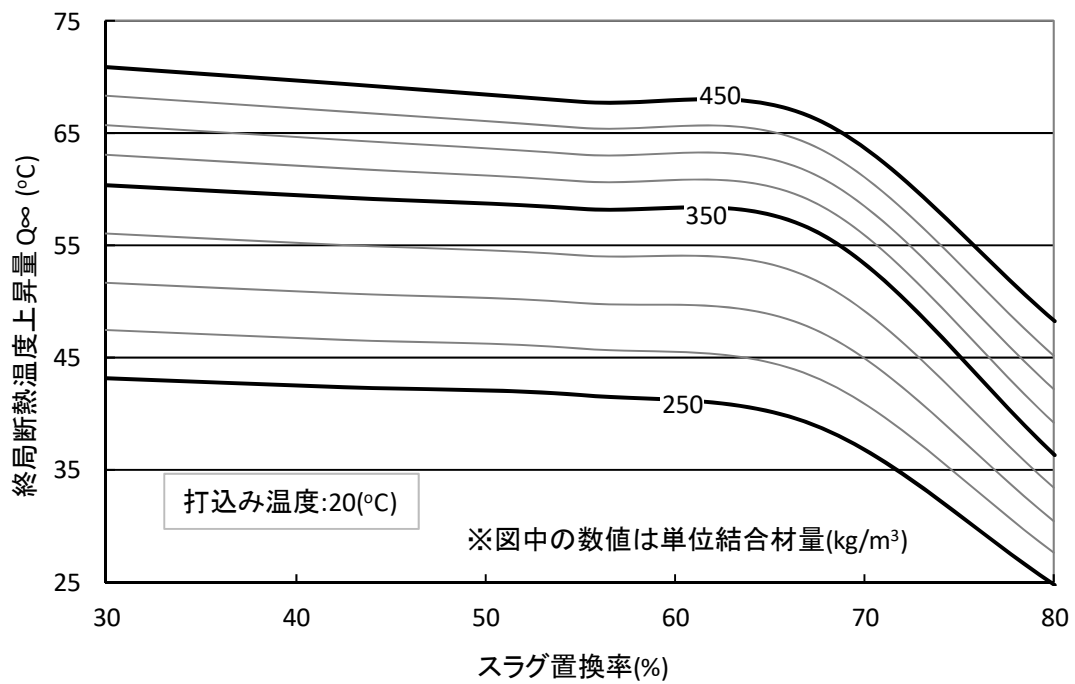
(3) 早強ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末のケース



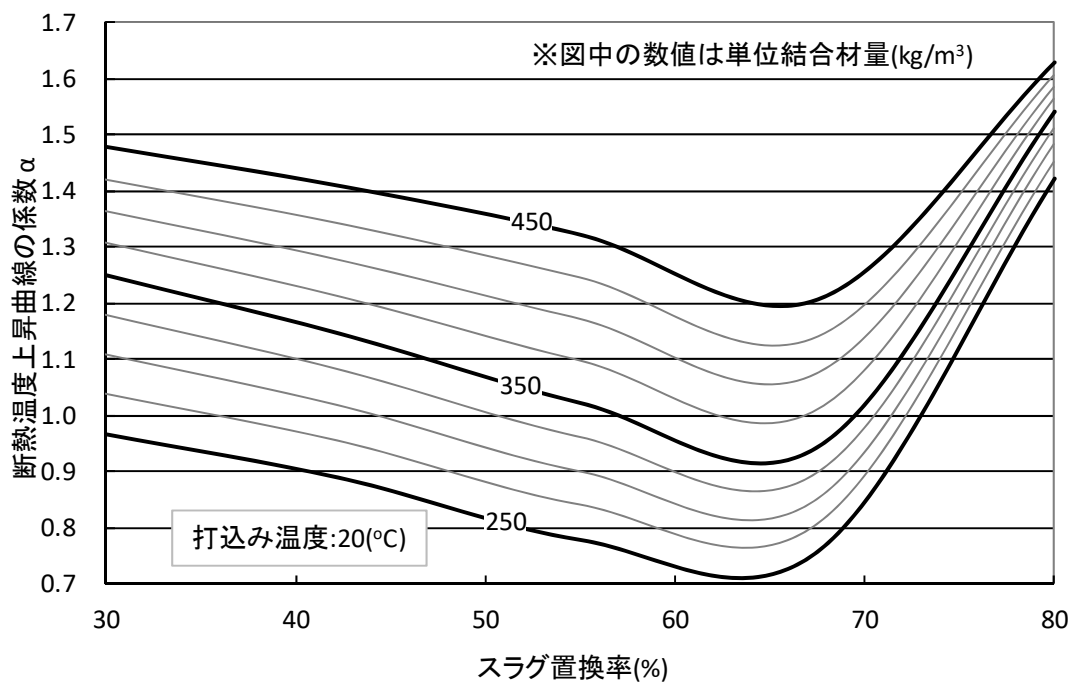
参考図 2-13 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 10°C)



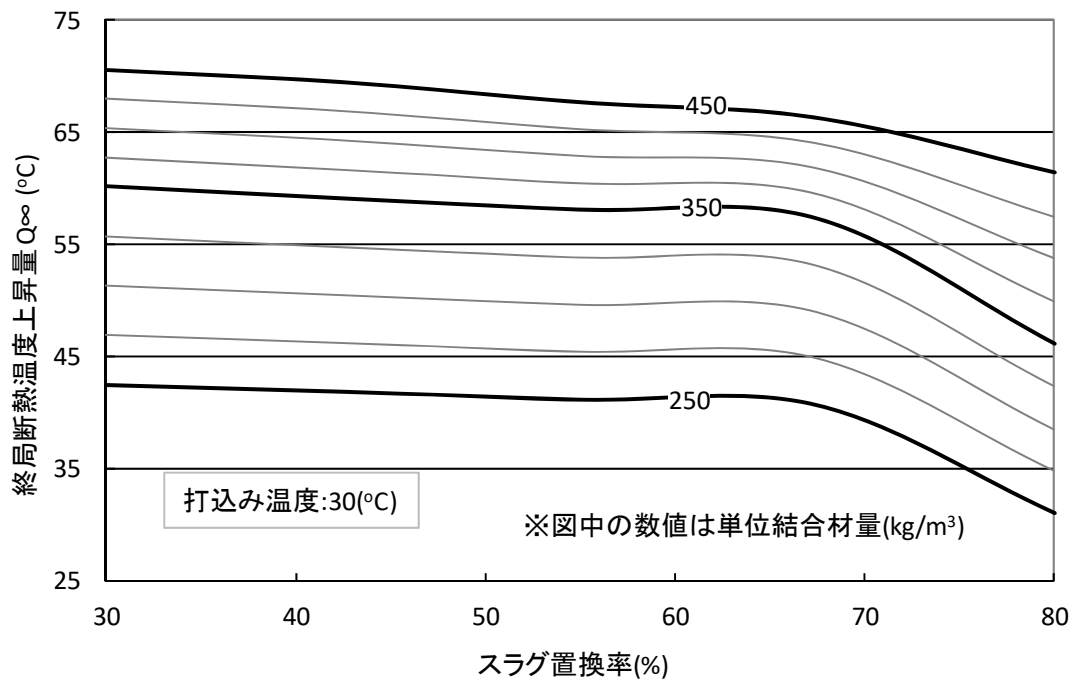
参考図 2-14 係数 α の算定図 (打込み温度 10°C)



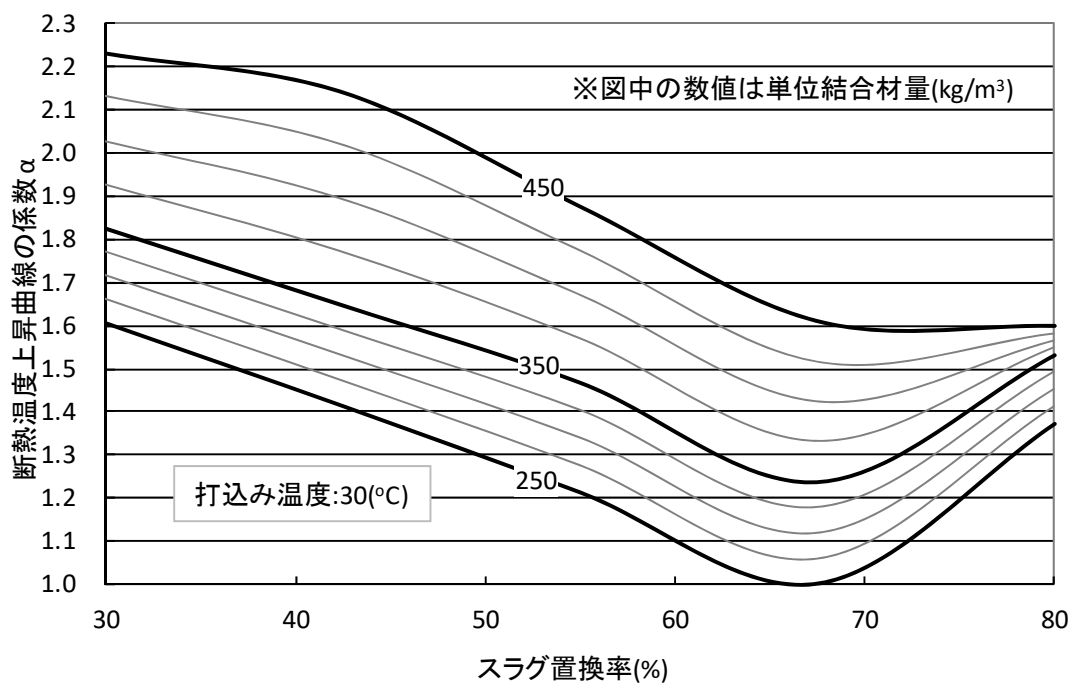
参考図 2-15 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 20°C)



参考図 2-16 係数 α の算定図 (打込み温度 20°C)

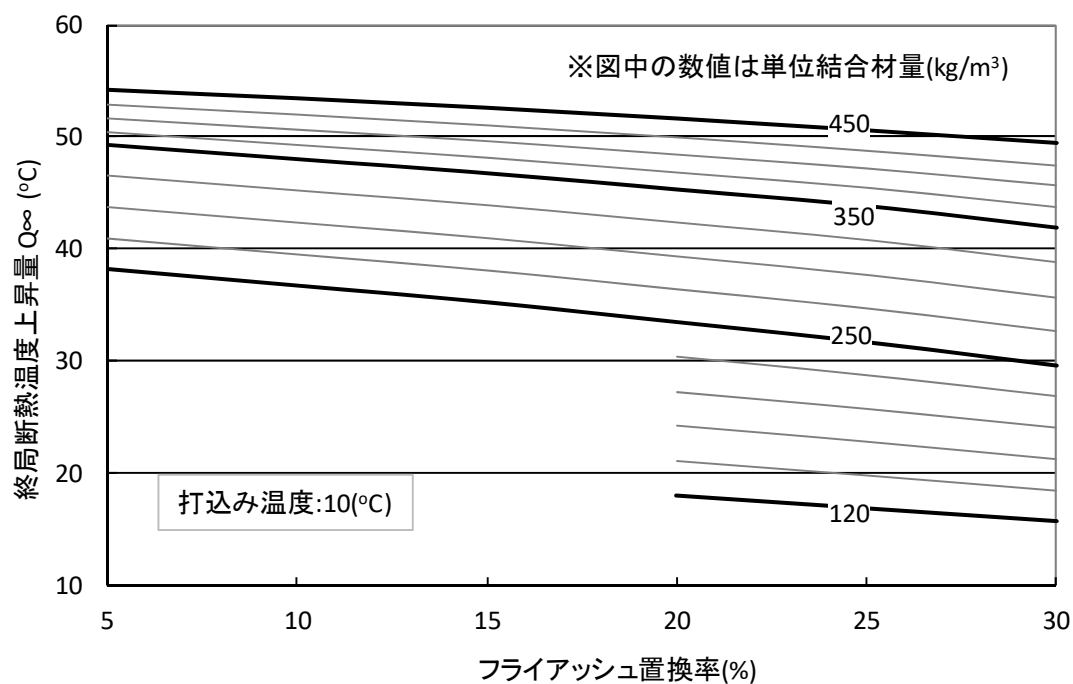


参考図 2-17 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 30°C)

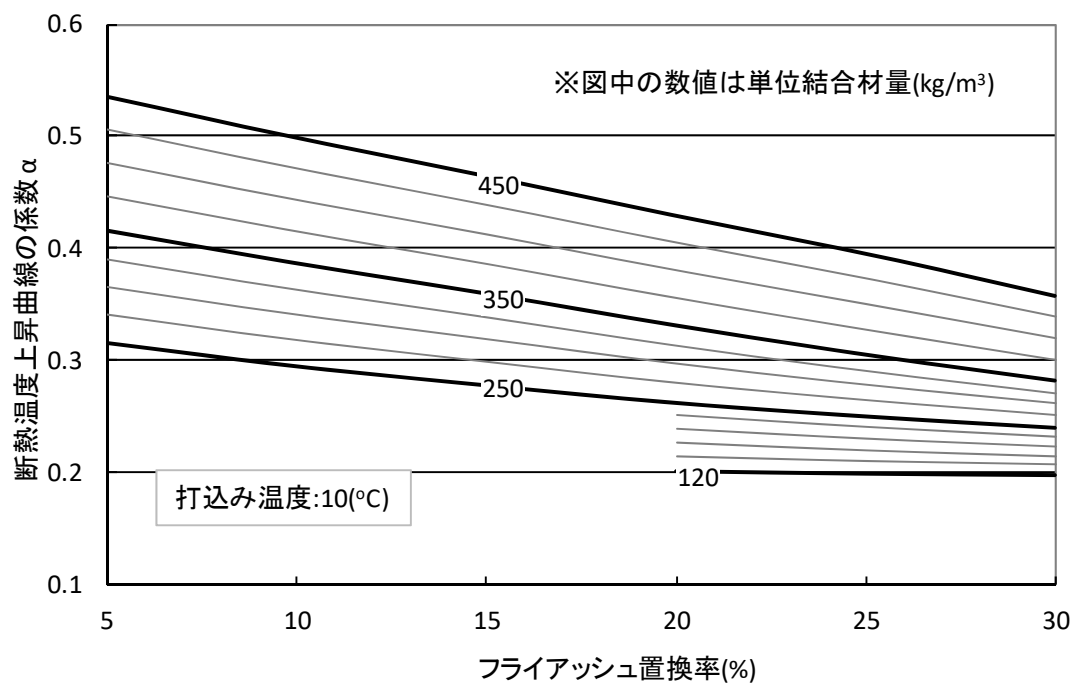


参考図 2-18 係数 α の算定図 (打込み温度 30°C)

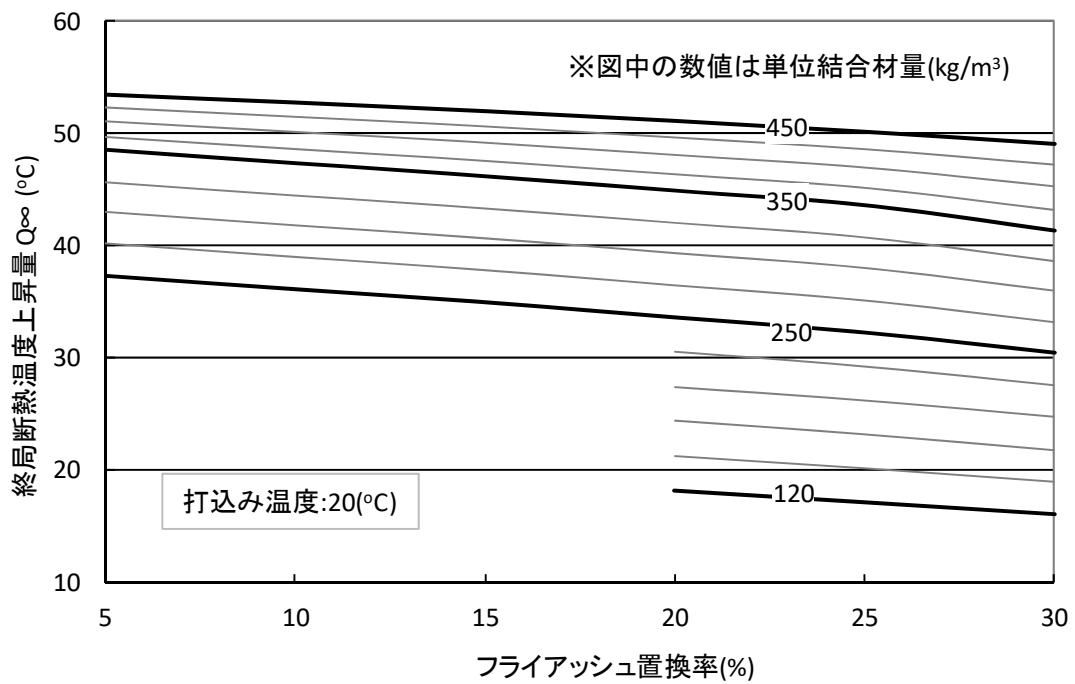
(4) 中庸熱ポルトランドセメント+フライアッシュのケース



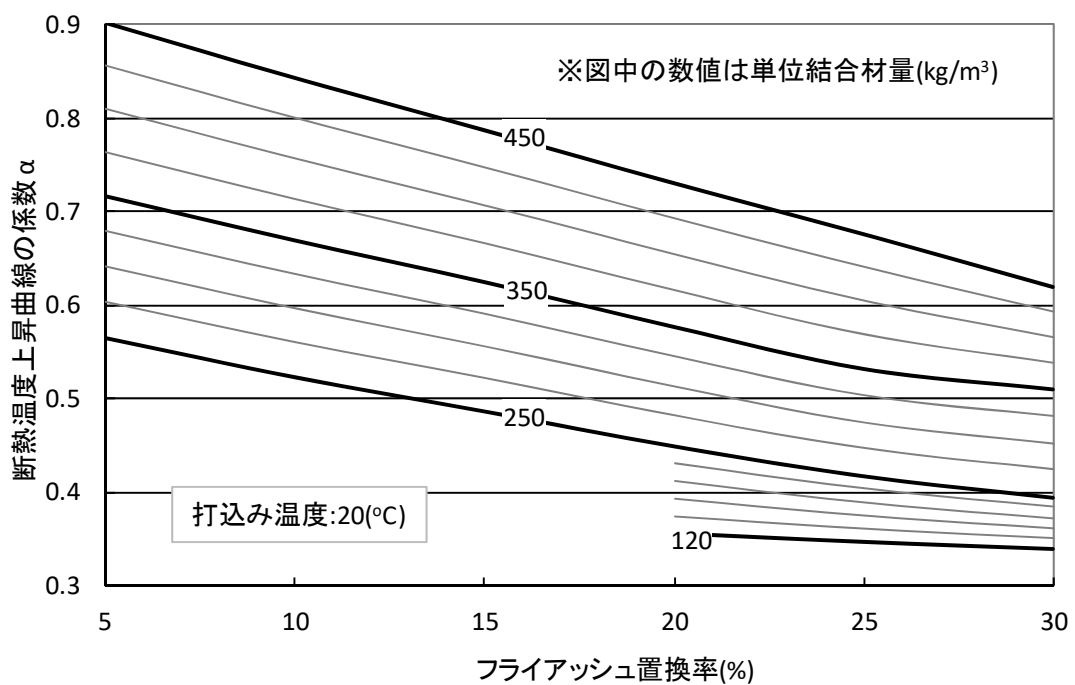
参考図 2-19 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 10°C)



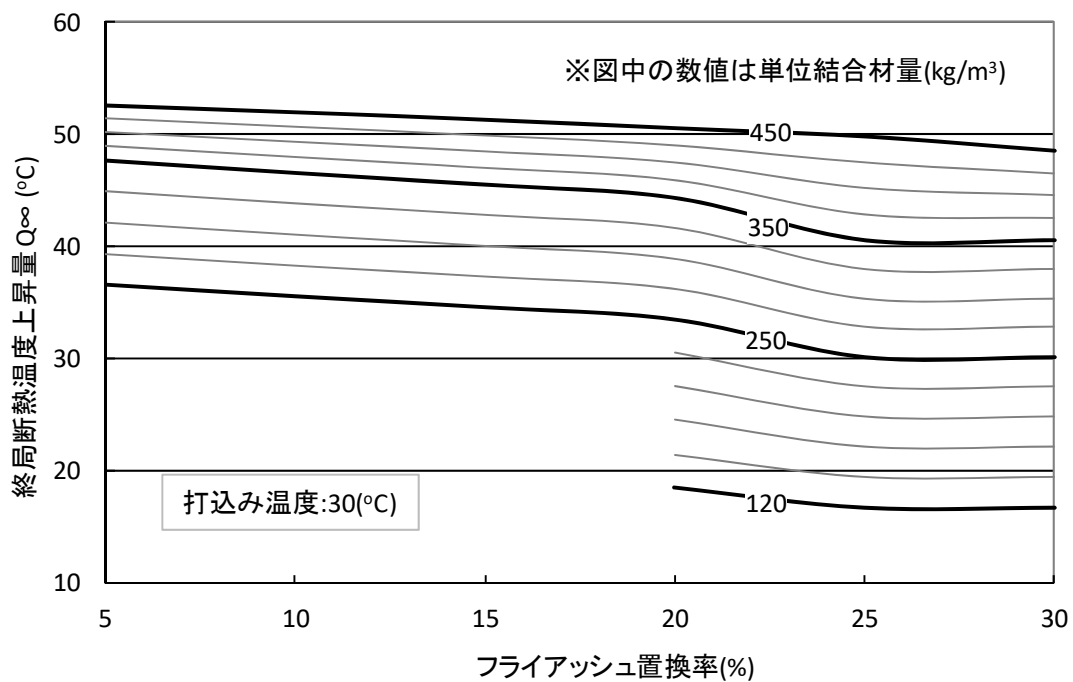
参考図 2-20 係数 α の算定図 (打込み温度 10°C)



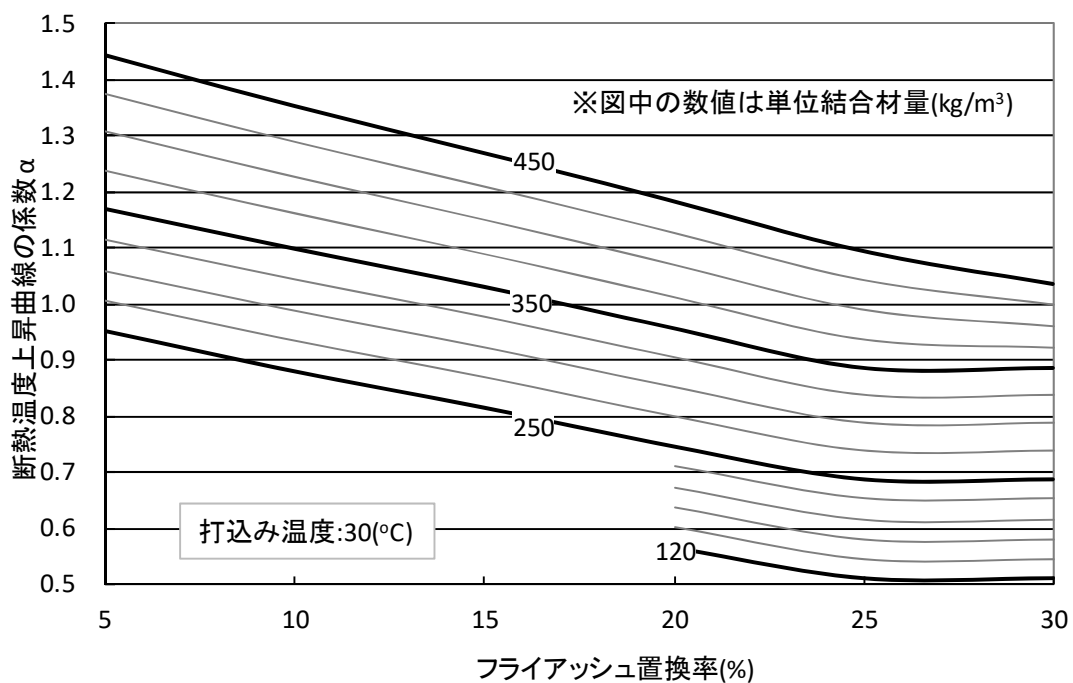
参考図 2-21 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 20°C)



参考図 2-22 係数 α の算定図 (打込み温度 20°C)

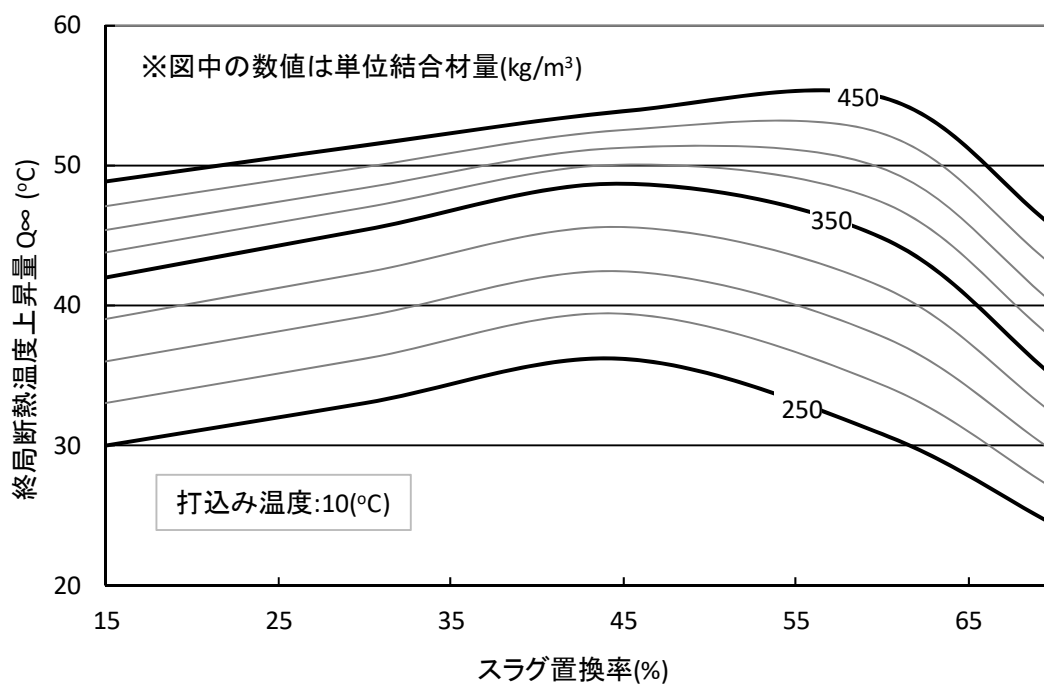


参考図 2-23 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 30°C)

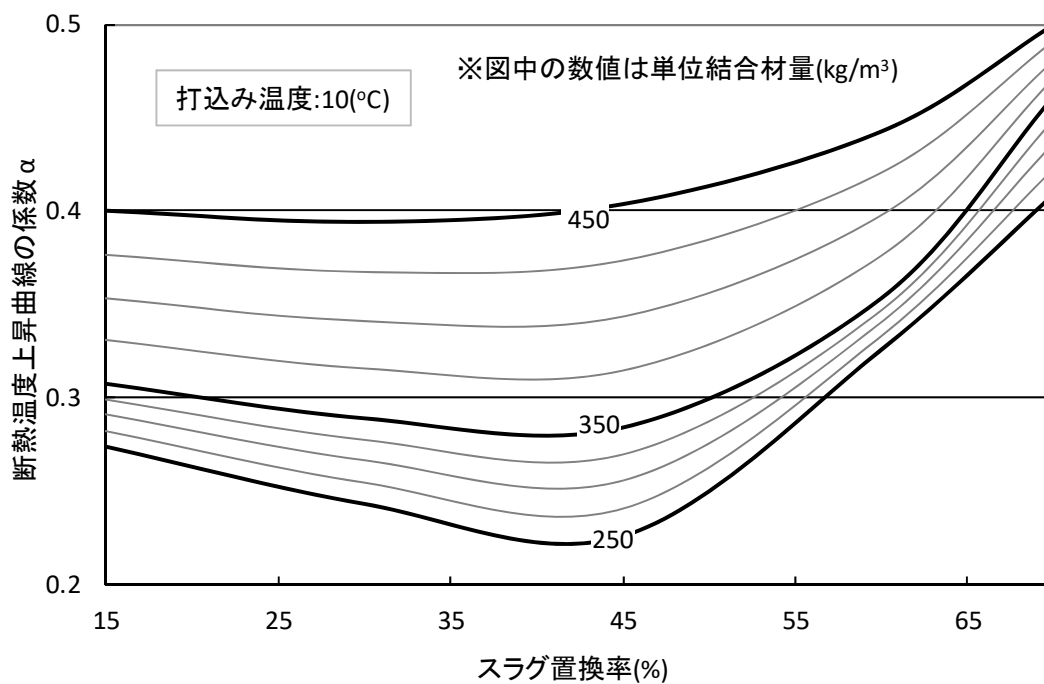


参考図 2-24 係数 α の算定図 (打込み温度 30°C)

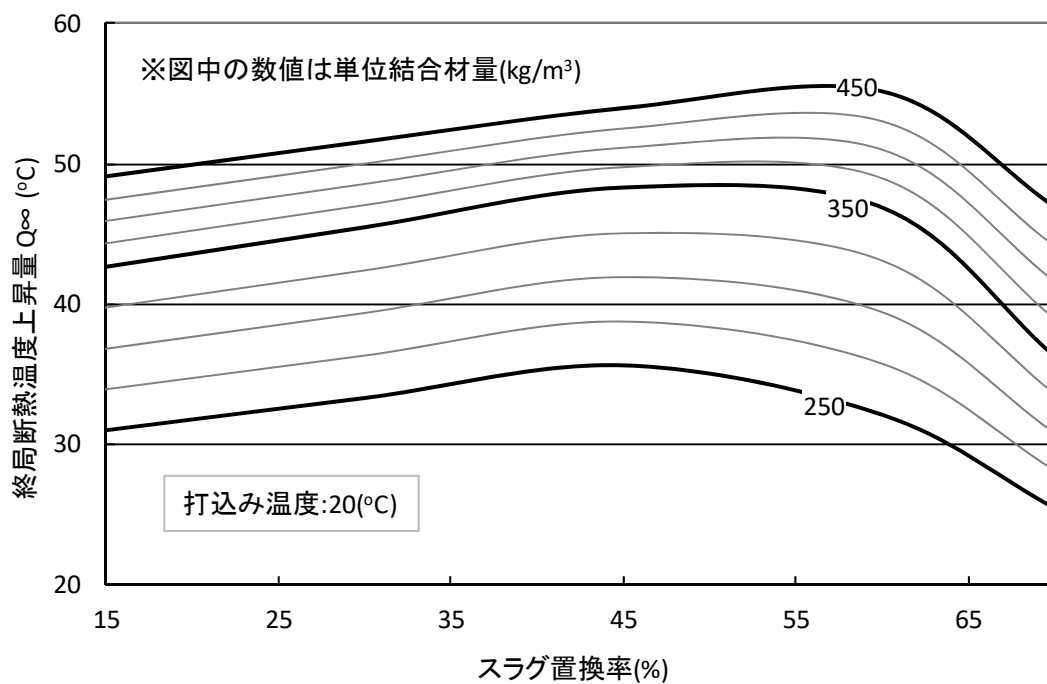
(5)低熱ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末のケース



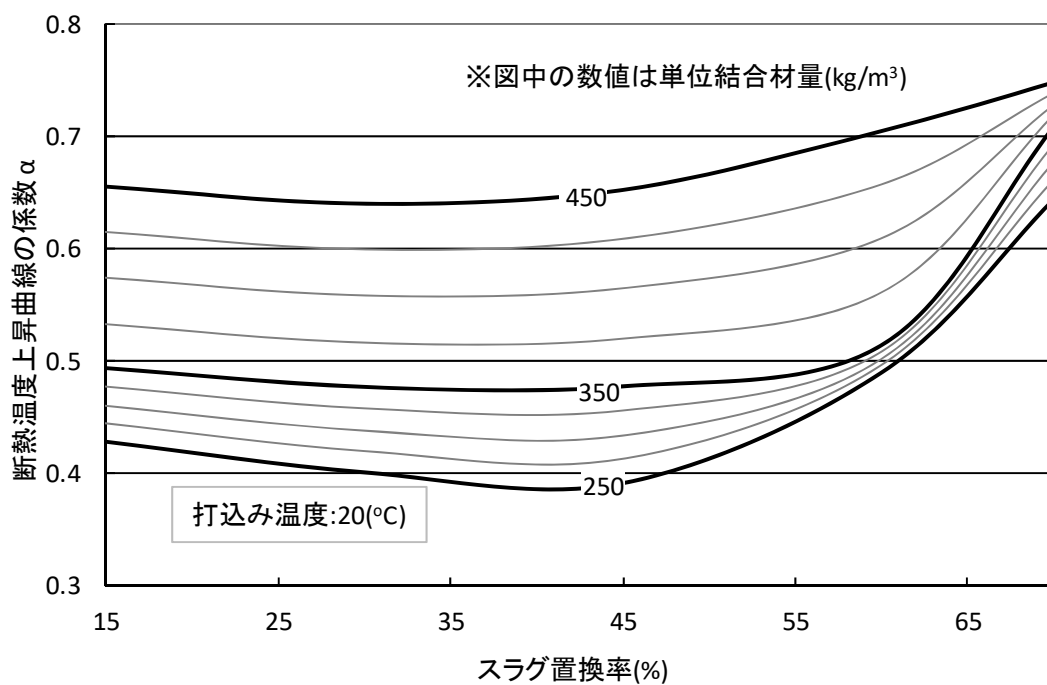
参考図 2-25 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 10°C)



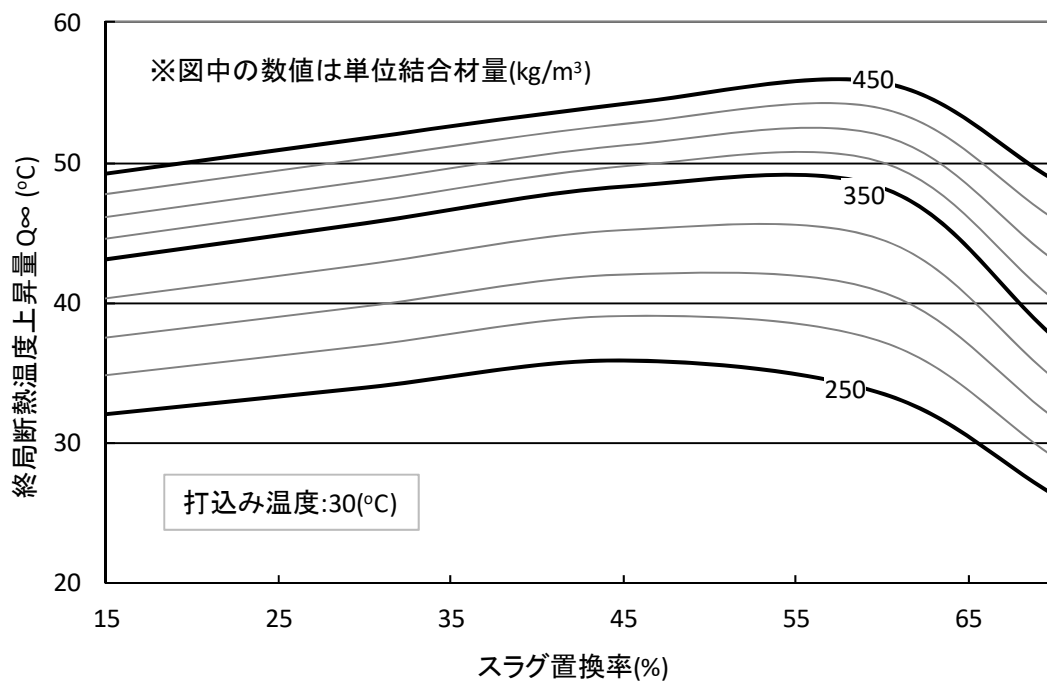
参考図 2-26 係数 α の算定図 (打込み温度 10°C)



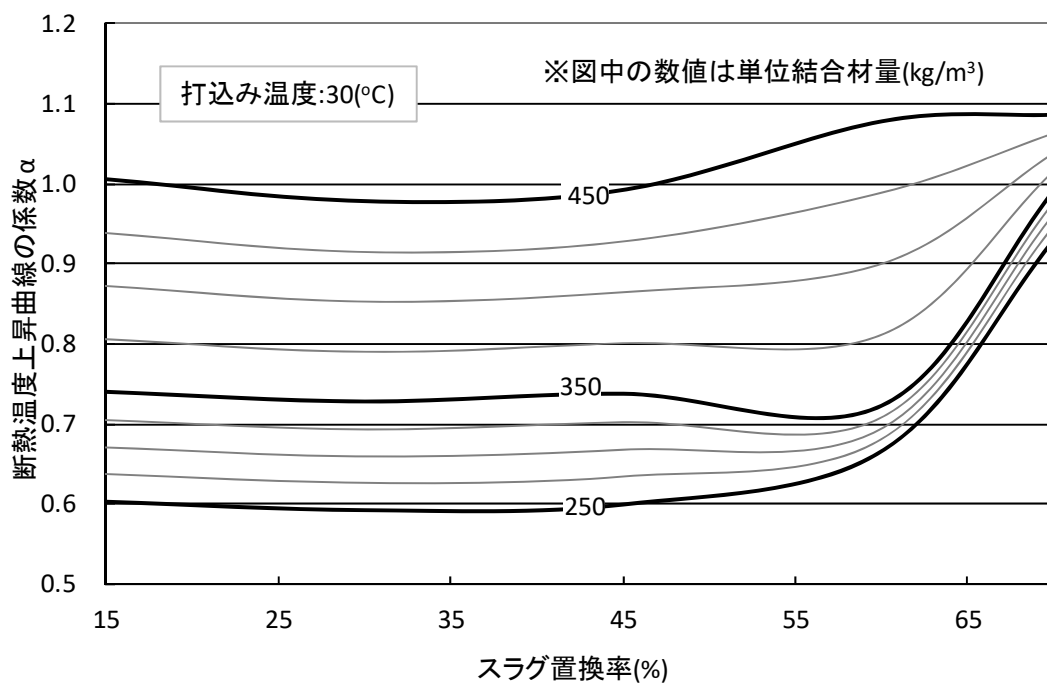
参考図 2-27 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 20°C)



参考図 2-28 係数 α の算定図 (打込み温度 20°C)



参考図 2-29 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の算定図 (打込み温度 30°C)



参考図 2-30 係数 α の算定図 (打込み温度 30°C)