

2. 実験の概要

有識者懇談会で策定した実験計画に基づき、コンクリートおよびモルタル・ペースト実験を行った。なお、実験計画の策定経緯は附 2 に示す通りであり、これまで取得されている大臣認定コンクリート (M-CON) のセメントが改正 JIS セメントに置き換わった場合において、強度式を変更することなく、コンクリートの性能 (主にフレッシュ性状および圧縮強度) が同等であることを検証するために策定されたものである。コンクリート実験は建築研究所 建築材料実験棟にて、モルタル・ペースト実験は太平洋コンサルタント九州技術センターにて実施した。

2.1 使用材料

2.1.1 セメント

(1)セメントの種類

実験に使用したセメントは、表-2.1 に示すように、JIS 改正前後の N (改正 JIS セメントおよび現行 JIS セメント) 4 種類およびこれらの N に高炉スラグ微粉末 (以下、BFS) を混合した高炉セメント B 種相当セメント (以下、BB) 4 種類とした。

なお、本実験で使用した現行 JIS セメントは少量混合成分として石灰石のみを混合したセメントであり、改正 JIS セメントは少量混合成分として石灰石を 10%混合したセメント (以下、NN) である。セメントおよび高炉スラグ微粉末の化学成分および物理的性質を表-2.2～表-2.5 に示す。

表-2.1 実験に使用したセメント

普通ポルトランドセメント (N)	1) NN (A 社製、改正 JIS セメント試製品) 2) N1 (A 社製、現行 JIS セメント市販品) 3) N2 (B 社製、現行 JIS セメント市販品) 4) N3 (C 社製、現行 JIS セメント市販品)
高炉セメント B 種相当セメント※2 (BB)	5) NBB (NN+BFS※1) 6) BB1 (N1+BFS※1) 7) BB2 (N2+BFS※1) 8) BB3 (N3+BFS※1)

※1：市販の高炉スラグ微粉末 3 種類 (2 社 3 工場) を等量混合したもの。

※2：BFS の分量はセメントの 43% (質量%) とした。

表-2.2 セメントの化学成分 (%)

セメント	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SrO	Cl
NN	4.61	19.19	4.81	2.69	63.61	1.18	2.15	0.22	0.29	0.29	0.52	0.07	0.05	0.022
N1	2.06	20.42	5.47	3.29	63.68	1.12	2.17	0.26	0.42	0.28	0.33	0.12	0.04	0.025
N2	2.46	19.33	5.72	2.97	64.13	1.32	2.56	0.30	0.37	0.29	0.14	0.09	0.05	0.018
N3	2.14	20.37	5.23	3.07	64.86	0.92	1.98	0.25	0.39	0.30	0.13	0.07	0.06	0.008

表-2.3 セメントの物理的性質

セメント	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性	圧縮強さ (N/mm ²)		
			水量 (%)	始発 h-min	終結 h-min	パット法	3d	7d	28d
NN	3.12	3790	28.2	2 - 05	3 - 15	良	31.4	46.3	63.3
N1	3.16	3270	27.2	2 - 20	3 - 10	良	32.9	49.5	64.2
N2	3.16	3240	27.9	1 - 45	2 - 50	良	32.9	47.0	63.2
N3	3.15	3390	28.2	2 - 00	2 - 50	良	29.5	44.6	62.7

表-2.4 高炉スラグ微粉末 (BFS) の化学成分 (%)

	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SrO	Cl
BFS	0.39	33.09	12.89	0.33	42.82	5.72	2.04	0.19	0.29	0.62	0.02	0.18	0.07	0.005

表-2.5 高炉スラグ微粉末 (BFS) の物理的性質

	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	活性度指数 (%)		
				7日	28日	91日
BFS	2.90	4370	101	72	99	113

2.1.2 骨材

(1) 細骨材

コンクリート実験に使用した細骨材は、静岡県掛川市産の山砂を使用した。主な物理的性質を表-2.6に示す。また、モルタル実験にはJIS R 5201で規定されている標準砂を使用した。

表-2.6 細骨材の物理的性質（コンクリート用）

区分	産地	ふるい通過量 (%)									粗粒率
		20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
細骨材 (山砂)	静岡県掛川市	—	—	100	99	82	65	49	28	7	2.70

区分	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	粘土塊量 (%)	安定性 損失量 (%)	有機 不純物 —	塩分 含有量 (%)
細骨材 (山砂)	2.59	2.54	2.05	1.6	0.15	2.7	淡い	0.000

(2) 粗骨材

コンクリート実験に使用した粗骨材は、栃木県鹿沼市産の碎石（硬質砂岩）を使用した。主な物理的性質を表-2.7に示す。

表-2.7 粗骨材の物理的性質（コンクリート用）

区分	産地	ふるい通過量 (%)										粗粒率
		25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
粗骨材 (硬質砂岩)	栃木県鹿沼市	100	92	—	39	7	2	—	—	—	—	6.60

区分	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	単位容積 質量 (kg/l)	粒径判定 実積率 (%)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	粘土塊量 (%)	安定性 損失量 (%)	すり減り (%)
粗骨材 (硬質砂岩)	2.65	2.63	1.62	61.6	0.59	0.3	0.0	0.7	10.7

3.1.3 練混ぜ水

コンクリート実験では蒸留水を使用した。モルタル・ペースト実験では、水道水を使用した。

3.1.4 混和剤

混和剤は、表-2.8に示す株式会社フローリック社製の化学混和剤を調合条件により適宜選定し、使用した。

表-2.8 使用した混和剤

種類	品名	主な成分
AE 減水剤	SV10	リグニンスルホン酸塩、オキシカルボン酸塩、ポリカルボン酸系化合物
高性能 AE 減水剤	SF500S	ポリカルボン酸系化合物、標準型
	SF500H	ポリカルボン酸系化合物、高強度用途型
	SF500F	ポリカルボン酸系化合物と界面活性剤系特殊増粘剤の複合体、増粘剤一液タイプ
	SF500R	ポリカルボン酸系化合物、遅延型
消泡剤	DF	ノニオン系界面活性剤

2.2 試験項目と水準

2.2.1 コンクリートのフレッシュ性状・強度特性検証試験

表-2.9 にコンクリートの強度特性を把握するために実施したコンクリート調合と試験項目を示す。コンクリートの練混ぜ・成形は、20℃の環境下で実施した。また、養生条件および強度試験材齢は表-2.10 に示すとおりとした。

表-2.9 コンクリート調合と試験項目（環境温度：20℃）

（○：試験実施）

使用セメント		水セメント比 (%)	試験項目		備考
			スランプ/ スランプフロー 空気量	圧縮強度	
N	NN	65	○	○	普通強度
		55	○	○	普通強度
	N1	55	○	—	普通強度の高流動コンクリート
	N2	45	○	○	普通強度/高強度
	N3	35	○	○	高強度
		25	○	○	高強度
BB	NBB	45	○	○	普通強度/高強度
	BB1	35	○	○	高強度
	BB2	25	○	○	高強度
	BB3				

表-2.10 圧縮強度試験の養生方法と材齢

（○：試験実施）

使用セメント		水セメント比 (%)	圧縮強度試験の養生方法と材齢					
			水中		簡易断熱		スラブ模擬	
			7日	28日	28日	91日	28日	91日
N	NN	65	○	○	—	—	○	○
		55	○	○	—	—	○	○
	N1	55 (高流動)	—	—	—	—	—	—
	N2	45	○	○	○	○	—	—
	N3	35	○	○	○	○	—	—
		25	○	○	○	○	—	—
BB	NBB	45	○	○	○	○	—	—
	BB1	35	○	○	○	○	—	—
	BB2	25	○	○	○	○	—	—
	BB3							

2.2.2 高温環境下のコンクリートのフレッシュ性状確認試験

JIS 改正前後のセメントを使用したコンクリートの高温環境下におけるフレッシュ性状を確認する実験を行った。表-2.11 に試験項目および水準を示した。

令和2年6月12日に大臣官房営繕部整備課課長補佐（構造担当）発布の事務連絡「暑中コンクリートの荷卸し時のコンクリートの温度について」において、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）」を引用し、以下に示す20°C環境下での2つの指標を満足すれば、荷卸し時のコンクリート温度の上限値を38°C以下とすることができるとされた。

- ①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。
- ②凝結試験によって貫入抵抗値が0.5N/mm²に達した時間が5時間23分以上（原文ではT₃₈3.5時間以上、補正式 T₃₈=0.65×T₂₀、T：凝結時間で添字は温度）であること。

ここでは、改正JISセメントを使用し、練上り温度が38°C以上となったコンクリート（環境温度は40°Cとした）のフレッシュ性状を、現行JISセメントを用いた場合と比較を行うこととした。また、上述の20°C環境下において①、②を満足するか確認するとともに、②に示されている補正式が改正JISセメントにおいても成立するか確認することとした。

表-2.11 高温環境下の影響：コンクリート調合と試験項目

使用セメント	環境温度 (°C)	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	使用混和剤	試験項目	
						スランプおよびスランプロス	凝結
NN、N1	20、40	35	23±1.5	2.0 以下	SF500R および DR	○	○

2.2.3 高温履歴下のモルタル・セメントペースト試験

改正JISセメントを使用し、荷卸し時のコンクリート温度が35°Cを超え、かつ高温履歴を受けた場合における硬化体の特性を確認することを目的として、高温履歴を受けた高強度モルタル硬化体の強度および空隙構造を確認し、現行JISセメントと比較した。さらに、改正JISセメントを上記の温度条件で使用した場合におけるセメントの反応率および水和生成物を評価する目的で、セメントペーストの示差熱-熱重量分析（以下、TG-DTA）および粉末X線回折およびリートベルト解析を行い、現行JISセメントの場合と比較した。表-2.12 に、モルタルおよびセメントペーストの試験項目と水準を示す。

表-2.12 試験項目と水準

試験項目	温度条件		モルタル		セメントペースト	
	20°C	90°C高温履歴	20°C	90°C高温履歴	20°C	90°C高温履歴
圧縮強度	○	○	-	-	-	-
細孔系分布	○	○	-	-	-	-
硬化体組織の観察 (SEM)	○	○	-	-	-	-
TG-DTA、XRD	-	-	○	○	○	○

2.3 調合条件

2.3.1 コンクリートの強度特性検証試験およびコンクリートによる高温環境下のフレッシュ性状確認試験

コンクリートの強度特性検証および高温環境下におけるコンクリートのフレッシュ性状の各実験に用いた調合条件を表-2.13に示す。水セメント比が65%および55%のコンクリートはAE減水剤を用い、45%以下は高性能AE減水剤を用いた。ただし、水セメント比55%のみ、普通強度レベルの高流動コンクリートへの大臣認定コンクリート対応として、増粘剤一液型の高性能AE減水剤を用いた調合条件を追加した。また、すべての調合において、空気量の影響を除くために、消泡剤を用いて空気量を2.0%以下に調整した。コンクリートによる高温環境下のフレッシュ性状への影響検証実験に用いたコンクリートの混和剤は、環境温度が20℃、40℃ともに遅延型の高性能AE減水剤を用い、スランプ23±1.5cmを目標値とした。これは上述の「暑中コンクリートの施工指針・同解説（2019年7月改定）」において、時間の経過にともなうスランプの低下量が規定されているためである。

なお、附2. 実験計画の策定経緯に基づき、調合計算におけるセメント密度はN 3.16g/cm³、BB 3.04g/cm³一定とした。

表-2.13 コンクリートの主な調合条件

セメント	混和剤	水セメント比 (%)	目標フレッシュ性状		環境温度 (°C)	備考
			空気量 (%)	スランプまたは (スランプフロー) (cm)		
N	SV10	65	2.0 未満 ^{※1}	18±1.5	20	
		55		18±1.5		
	SF500F	55		(45±7.5)	20	
	SF500S	45		23±1.5	20	
		35		(60±10)		
	SF500R	35		23±1.5	20,40	高温環境下
	SF500H	25		(65±10)	20	
BB	SF500S	45	23±1.5	20		
		35	(60±10)			
	SF500H	45	(65±10)	20		
		25	(65±10)			

※1：消泡剤を使用して調整

2.3.2 高温度履歴下のモルタル・セメントペースト試験

モルタルの調合条件を表-2.14に示す。モルタルの水セメント比は35%、砂セメント比(S/C)は2.0とした。モルタルの流動性は、JIS R 5201に規定されるフロー試験用機械器具を使用して行い、フローコーンを抜き取り後に落下運動を与えないモルタルフロー(0打フロー)が220±20mm、空気量が3.0%以下を満足するように、混和剤の添加量を調整した。セメントペーストは、モルタルと同一の水セメント比および混和剤添加量とした。

表-2.14 モルタルの調合条件

調合条件			化学混和剤の種類		目標フレッシュ性状	
水セメント比 (%)	S/C (-)	設計空気量 (%)	高性能減水剤	消泡剤	モルタルフロー (mm)	空気量 (%)
35.0	2.0	3.0	SF500S	DF	220±20	3.0 以下

2.4 練混ぜおよび成形

コンクリートの強度特性検証試験および高温環境下におけるコンクリートのフレッシュ性状実験におけるコンクリートの練混ぜは、JIS A 1138「試験室によるコンクリートの作り方」に準じて実施した。また、コンクリートの強度特性検証試験における供試体の成形は、JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準じて実施した。

練混ぜは、すべての調合で容量 50L の強制 2 軸型ミキサを用いた。練混ぜの方法は、水セメント比 45% 以上の調合では一括練りとし、35%以下はモルタル先練りとし、練混ぜ時間は表-2.15 および図-2.1 に示すように、調合毎に適宜調整した。

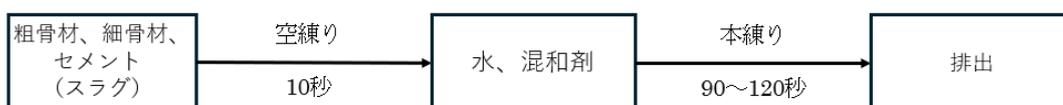
モルタルおよびペーストの練混ぜは、室温 38℃、湿度 80%RH の恒温恒湿室においてモルタルミキサを用いて図-2.2 の手順で行った。1 回の練混ぜ量は、モルタルでは 3.5L、セメントペーストでは 3.0L とした。供試体および分析試料の成形は、JSCE-F 506 を参考に、練混ぜ終了直後に内寸φ50×100mm の型枠内に 2 層で打ち込み、直径 9mm の突き棒でそれぞれ 25 回突いたうえで、タッピングを十分に行い締め固めた。なお、本実験では、比較用に室温 20℃、湿度 70%RH 以上の恒温室においても同様の実験を実施した。

表-2.15 調合毎の練混ぜ方法

使用セメント	水セメント比 (%)	スランブまたは (スランブフロー) (cm)	練混ぜ方法と本練りの練混ぜ時間
N	65	18±1.5	一括練り (本練り 1 : 90 秒)
	55	18±1.5	一括練り (本練り 1 : 90 秒)
	55	(45±7.5)	一括練り (本練り 1 : 120 秒)
	45	23±1.5	一括練り (本練り 1 : 120 秒)
	35	(60±10)	モルタル先練り (本練り : 90 秒)
	35	23±1.5	20℃→モルタル先練り (本練り : 150 秒) 40℃→一括練り (本練り : 120 秒)
	25	(65±10)	モルタル先練り (本練り : 120 秒)
BB	45	23±1.5	一括練り (本練り 1 : 120 秒)
	35	(60±10)	モルタル先練り (本練り : 90 秒)
	25	(65±10)	モルタル先練り (本練り : 150 秒)



(1) 一括練りの場合 (水セメント比 35%以下)

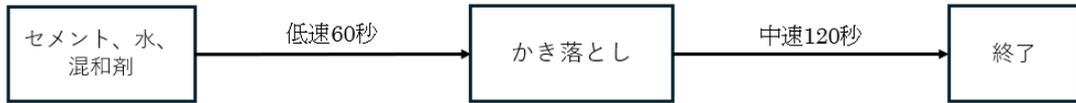


(2) モルタル先練りの場合 (水セメント比 45%以上)

図-2.1 コンクリートの練混ぜ手順



(1) モルタルの場合



(2) セメントペーストの場合

図-2.2 モルタルおよびセメントペーストの練混ぜ手順

2.5 養生

2.5.1 コンクリートのフレッシュ性状・強度特性検証試験

コンクリートの強度特性検証試験における養生は、以下の3通りで実施した。

- ①水中養生：供試体脱型後、供試体を所定の材齢まで、20℃の恒温水槽で養生する方法
- ②簡易断熱養生：供試体作成後、供試体を所定の材齢まで、**図-2.3**に示す簡易断熱養生箱に入れて20℃の室内で養生する方法
- ③スラブ模擬養生：供試体作製後5日間20℃室内にて封緘養生した後脱型し、直ちに供試体側面をアルミテープで巻き付け、水分の逸散を防止する。供試体の上下面はそのままコンクリート面を露出させたまま温度20℃、湿度60%RHの室内に所定の材齢まで静置する方法（**図-2.4**）



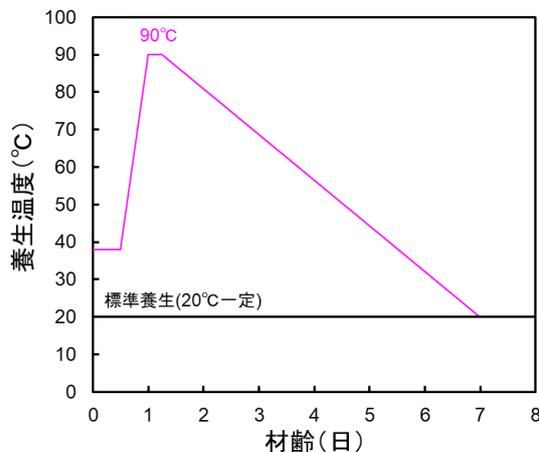
図-2.3 簡易断熱養生箱



図-2.4 スラブ模擬養生

2.5.2 高温度履歴下のモルタル・セメントペースト試験

供試体および分析用資料は、材齢24時間まで温度38℃、湿度80%RHの室内で型枠内養生を行った後に脱型し、**図-2.5**に示す温度履歴で養生を行った。すなわち、初期温度38℃から昇温し、最高温度90℃を6時間保持した後に、材齢7日で20℃になるように降温した。材齢7日以降は20℃恒温室内で封緘養生を行った。また、比較として実施した室温20℃の恒温室内で実施した実験では、材齢24時間まで恒温室内で型枠内養生を行った後に脱型し、以降は所定の材齢まで20℃の水中養生を行った。



- 12時間まで：初期温度38℃を保持
- 12時間～24時間：最高温度90℃まで昇温（温度勾配：約4.4℃/h）
- 24時間～30時間：最高温度90℃を保持
- 30時間～168時間（7日）：最高温度から20℃まで降温（降温勾配：約0.51℃/h）
- 7日以降：20℃環境にて所定材齢まで封緘状態で保管

図-2.5 モルタル・セメントペースト試験で設定した養生条件

2.6 試験方法

2.6.1 スランプ、スランプフローおよび空気量試験

スランプは JIS A 1101、スランプフローは JIS A 1150、空気量は JIS A 1128 にそれぞれ準拠して試験を実施した。

2.6.2 凝結試験

凝結時間は JIS A 1147 に準拠した方法で試料を採取し、貫入抵抗値が 0.5N/mm^2 になるまでの時間を測定した。

2.6.3 圧縮強度試験

圧縮強度は JIS A 1108 に準拠して試験を実施した。

2.6.4 細孔径分布

測定試料は、測定材齢まで養生した円柱供試体($\phi 50 \times 100\text{mm}$)の高さ中央より、厚さ 10 mm 程度の盤状片を 1 枚切断採取し、アセトンで水和停止を行った。採取した盤状片より、ニップを用いて 5 mm 角程度の小片を採取し、1 週間真空乾燥したものを測定に供した。測定には micromeritics 社製水銀圧入式ポロシメーター AutoPoreV9620 を用いた。測定の概要を以下に記す。

ガラス製試料容器(試料室容積 5 ml, キャピラリ容積 0.392 ml)に、試料中の細孔容積が試料容器のキャピラリ容積の 25~90 %となるように試料を量り取り、ポロシメーターにセットし、容器内に水銀を注入した。次いで容器ごと圧力を加え、水銀を試料の細孔に圧入し、その量を測定した。圧力は段階的に増加させた。加える圧力と水銀が圧入される細孔の大きさには下式の関係があるため、これにより各圧力に相当する細孔径を算出した。また、各圧力における水銀の圧入量を、その時点までに水銀が圧入された細孔の量とし、両者より細孔径分布を求めた。

【圧入圧力と細孔径の関係式】

$$d = -4\gamma \cos\theta / P$$

d : 細孔径 (直径)

γ : 水銀の表面張力 0.484 N / m

θ : 水銀と試料との接触角 130° ($\cos \theta = -0.643$)

P : 圧入圧力 MPa

2.6.5 走査型電子顕微鏡による硬化体組織の観察

観察試料は供試体から採取された円盤状片の中央から、大きさが 1.5cm 角程度の小片を採取した。これを外径が 25 mm のプラスチック製リングに入れ、樹脂で包埋した。樹脂の硬化後、リングの底面から 2 mm 程度の位置で切断した後、切断面を研磨して観察面とした。なお、研磨は伸展液と洗浄液に有機溶剤を用いる湿式研磨とした。観察面に導電性を付与する目的で炭素を蒸着した後、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察に供した。

SEM 観察は、物質の平均原子番号や疎密の違いを明るさの違いとして観察できる反射電子像観察とした。観察条件を以下に示す。

観察装置 : 日立ハイテク社製 SEM SU5000

加速電圧 : 15 kV

なお、反射電子像では、物質の平均原子番号が大きい物質は明るく、小さい物質は暗く観察される。また同じ物質であれば、緻密であれば明るく、疎であれば暗く観察される。

2.6.6 TG-DTAによる水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの定量

分析では、φ50×100mmの円柱供試体の高さ方向中央付近から湿式ダイヤモンドカッターを用いて8～10mm程度にスライスされた試料を使用した。スライスした試料は、メノウ乳鉢を用い、目開き90μmの網ふるい全通となるように微粉碎した。なお、試料は材齢日に水和停止されたものであり、粉碎は窒素環境下で行った。測定は、ネッチ社製 示差熱天秤装置 STA 2500 を用いて、以下の条件で測定した。

【測定条件】

測定温度範囲：室温～1000℃

昇温速度：20℃/min

基準物質：α-Al₂O₃（アルミナ）

試料質量：約20mg

炉内ガス流通：N₂ 100 ml/min

測定結果より、450℃付近の水酸化カルシウムの脱水による質量減少率と、550～850℃付近の炭酸カルシウムの脱炭酸による質量減少率を求めた。これらの質量減少率から、水酸化カルシウム量を式(1)より、炭酸カルシウム量を式(2)より算出した。

$$\text{水酸化カルシウム量(\%)} = \text{脱水による減量(\%)} \times 74.10/18.02 \quad (1)$$

$$\text{炭酸カルシウム量(\%)} = \text{脱炭酸による減量(\%)} \times 100.09/44.01 \quad (2)$$

74.10：水酸化カルシウムの分子量

18.02：水の分子量

100.09：炭酸カルシウムの分子量

44.01：二酸化炭素の分子量

2.6.7 粉末 X 線回折およびリートベルト解析によるセメント鉱物の反応率の算出および非晶質生成量の定量

(1) 各鉱物の定量方法

3.6.6に示す手順で調製した粉末試料に、内部標準としてα-Al₂O₃(コランダム)を内割りで10%添加後、十分に均一になるよう混合機を用いて混合し、測定に供した。装置は PANalytical 社製 X 線回折装置 Empyrean を使用した。リートベルト解析は、星野らの手法²⁾に準拠した。解析ソフトは High Score Plus (PANalytical スペクトリス社製)を用い、各試料で同定された鉱物を定量対象鉱物として定量分析を行った。各鉱物量は式(3)より、非晶質量は式(4)より算出した。測定条件を下に示す。

$$M'_x = M_x \times A/R \times 100 / (100 - A) \quad (3)$$

$$\text{非晶質量} = 100 \times (R - A) / (R \times ((100 - A) / 100)) \quad (4)$$

ここに、M'_x：鉱物の定量値 (%)

M_x：リートベルト解析で定量した値 (%)

R : リートベルト解析で定量したコランダムの値 (%)

A : コランダム混合率 (%) (本試験では 10%)

【測定条件】

管球条件 : 45kV-40 mA

測定範囲 : 5~65°

ステップ幅 : 0.03 ° /step

(2) セメント鉱物の反応率算出方法

試料の反応率の算出手順を以下に示す。

- ① ペースト試料のリートベルト解析による定量値を ig.loss (TG : 室温~1000°Cまでの強熱減量) を用いて、酸化物換算した。
- ② 初期セメントのリートベルト解析による定量値から、せつこうの結合水および炭酸カルシウムの CO₂ 量を算出し、あわせて ig.loss とした。その後、この値を使って、初期セメントの各鉱物の値を酸化物換算した。
- ③ (1)式にて C₃S および C₂S の反応率を算出した。

$$\text{セメント鉱物の反応率(\%)} = \left(1 - \frac{\text{ペーストの C3S ないし C2S(酸化物換算値)}}{\text{初期の C3S ないし C2S(酸化物換算値)}} \right) \times 100 \quad (5)$$

2) 星野清一, 平尾宙, 山田一夫 : X線回折/リートベルト法によるセメントペーストの水和反応解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006