

# 1. 河川構造物の DEF 現象を考慮した長期耐久性の検証（養生1年目）

## Verification of Long-term Durability considering the DEF Phenomenon of River Structures (1 year passed)

技術支援課 笹木 俊一、○前田 洋平

### 1. はじめに

DEF (Delayed Ettringite Formation) 現象は、打ち込まれたコンクリートの最高温度履歴、硫酸塩、水分供給の有無が影響するものであり、2016年11月に JCI ひび割れ制御指針<sup>1)</sup>が改定され、DEF ひび割れ防止に必要な事項について規定された。

東京都が建設及び管理する河川構造物には、蒸気養生により材齢初期に高温に曝されるプレキャストコンクリート製品や、内部温度上昇が大きいマスコンクリートを使用する場合もあることから、DEF ひび割れに対する検討が必要である。しかし、その発生メカニズムや現場管理手法等は未確立なのが現状である。

本稿では、DEF ひび割れの生起条件や生じた際の現場管理の手法確立を目的とした30年の長期に亘る確認試験のうち、供試体作製から養生1年目までの確認試験結果を報告する。

### 2. 供試体作製

確認試験で用いる供試体は、プレキャストコンクリート製品の蒸気養生を想定した温度履歴を与えた供試体（プレキャスト製品供試体）4種類（PH、PL、PEH、PEL）と、実際の現場で施工されたマスコンクリートを想定した温度履歴を与えた供試体（マスコンクリート供試体）3種類（Ma、Mb、N）の計7種類である。

供試体の概要は表-1.1及び表-1.2に示すとおりで、各供試体に与えた温度履歴を図-1.1及び図-1.2に示す。

プレキャスト製品供試体の配合及び温度履歴は、普通エコセメントが普通ポルトランドセメントよりSO<sub>3</sub>量が多くDEF現象が発生しやすいと想定できることや、プレキャスト製品の製造会社へのアンケート調査結果<sup>2)</sup>、DEFによる硫酸塩膨張の生起条件に関する検討<sup>3)</sup>を参考にして設定した。

表-1.1 供試体の仕様（プレキャスト製品供試体）

略号	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スラブ (cm)	最大骨材寸法 (cm)	セメント種類	蒸気養生条件				作製日	保管場所
					最高温度	最高温度継続時間	昇温度速度	降温度速度		
PH	24	8	20	普通ポルトランドセメント	90℃	12時間	20℃/h	徐々に冷却し、24時間程度で取出	2018/10/30	戸田橋実験場 旧計測小屋内 水中養生
PL	24	8	20	普通ポルトランドセメント	65℃	4時間	20℃/h	自然放冷	2018/10/30	
PEH	36	10	20	普通エコセメント	90℃	12時間	20℃/h	徐々に冷却し、24時間程度で取出	2018/11/1	
PEL	36	10	20	普通エコセメント	50℃	4時間	20℃/h	自然放冷	2018/11/1	

表-1.2 供試体の仕様（マスコンクリート供試体）

略号	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スラブ (cm)	最大骨材寸法 (cm)	セメント種類	供試体温度履歴				作製日	保管場所
					最高温度	最高温度継続時間	65℃以上継続時間	温度計測時間(35℃以上)		
Ma	24	15	20	低熱ポルトランドセメント	70℃	24時間	約135時間	624時間(26日)	2019/6/14	土木技術支援・ 人材育成セン ター新砂庁舎 1Fコンクリート 実験室内 水中養生
Mb	24	8	20	低発熱高炉B種	70℃	24時間	約110時間	624時間(26日)	2019/6/14	
N	24	8	20	普通ポルトランドセメント	87℃	24時間	約200時間	624時間(26日)	2019/6/14	

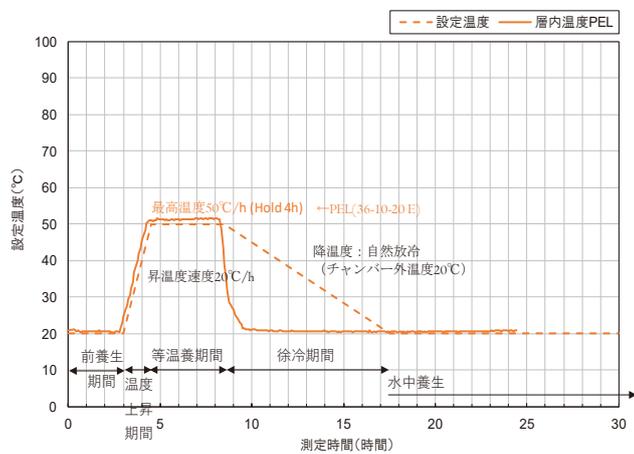
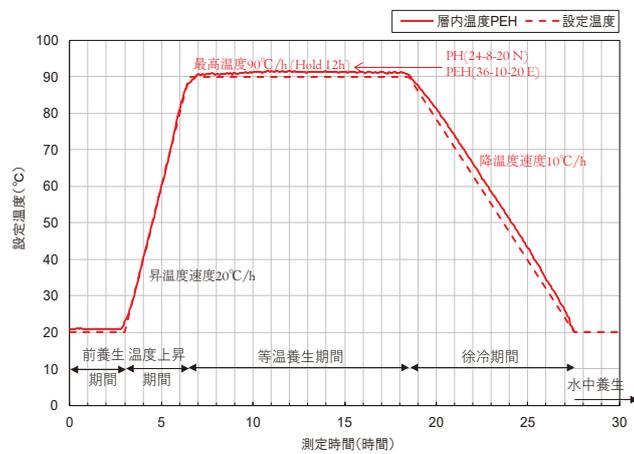
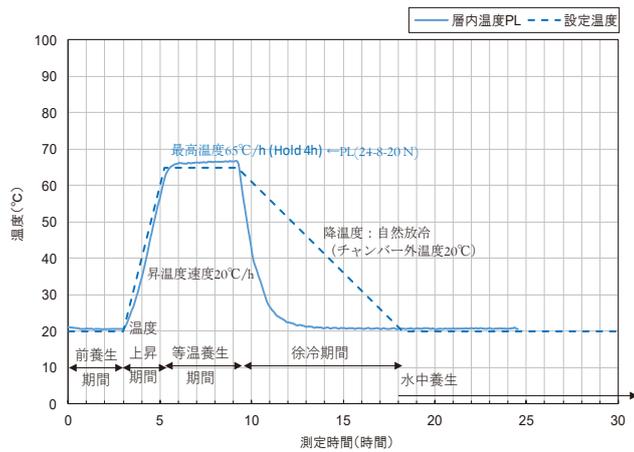
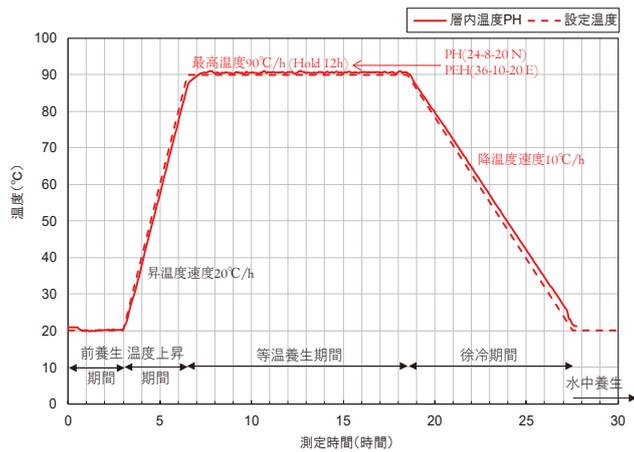


図-1.1 プレキャスト製品供試体の製作 (温度履歴)

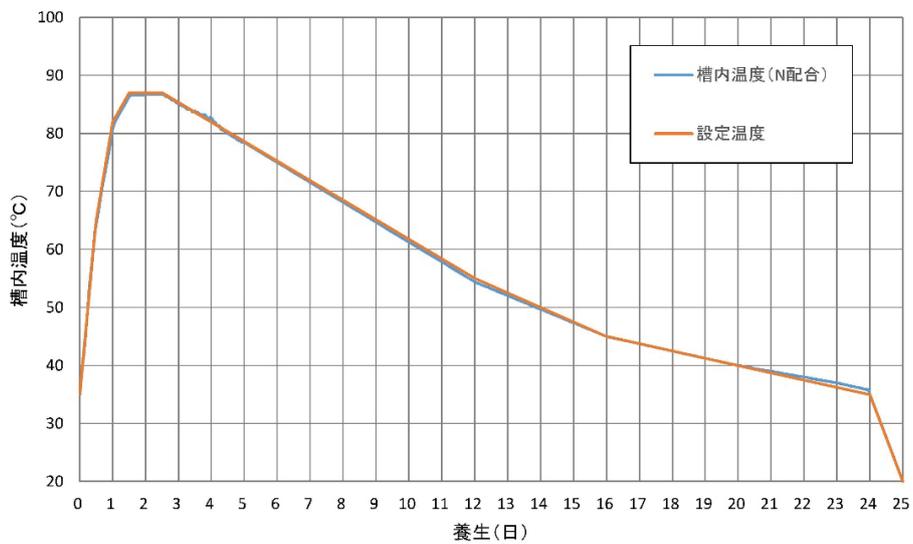
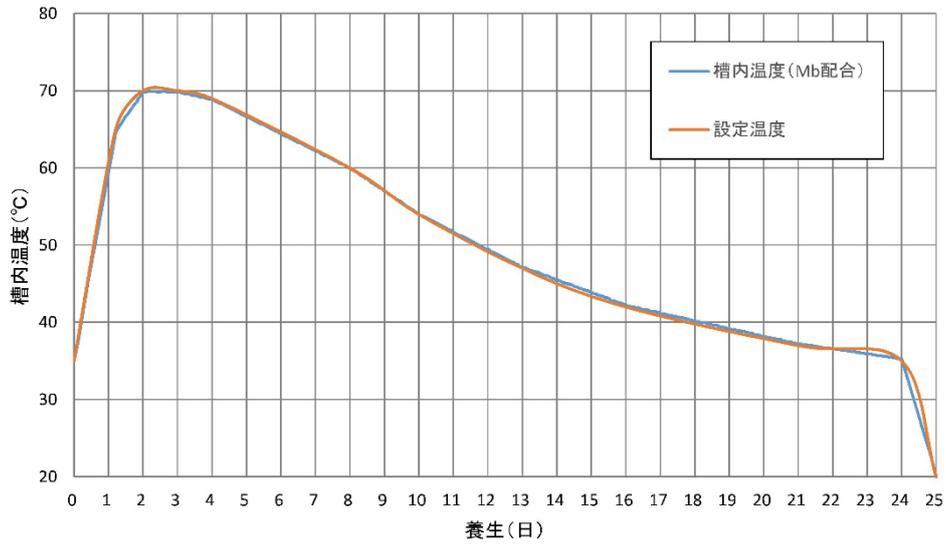
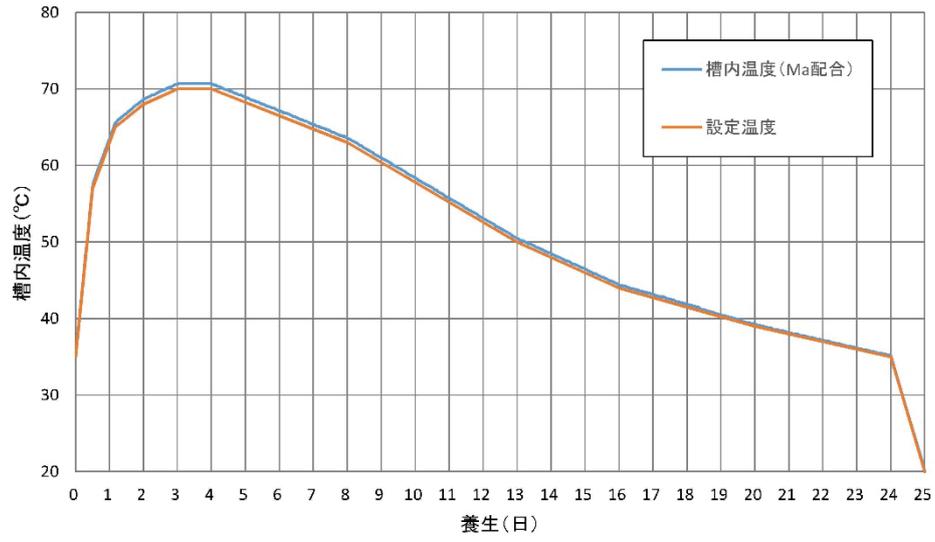


図-1.2 マスコンクリート供試体の製作（温度履歴）

マスコンクリート供試体は、実際に現場で使用された低熱ポルトランドセメントに加えて、一般的に使用される低発熱高炉 B 種と普通ポルトランドセメントを比較対象として選定した。

製作した供試体は原則水中養生により保管し、定期的（28日、1年、3年、5年、10年、20年、30年を予定）に、表-2に示す5種類の試験を行うことで、DEF 現象及び DEF ひび割れの発生について検証を実施している。

### 3. 養生1年目までの確認試験結果

5種類の確認試験結果を総合して検証した結果、すべての供試体で、養生1年目までに DEF 現象の発生は確認されなかった。今後、DEF 現象や DEF ひび割れが発生した場合は、圧縮強度及び動弾性係数の低下や、 $500 \times 10^{-6}$ を超える膨張ひずみの発生<sup>4)</sup>、エトリングaitの骨材周りやセメントペースト部への集中等がみられると想定される。

#### (1) 圧縮強度試験（表3.1～2、図-2.1～2）

圧縮強度は経年により微増であり、通常のコンクリートの水和反応による強度上昇と考えられる。なお、プレキャスト製品供試体において、同配合で高温度履歴を与えずに20℃水中養生を行った供試体（PH・PL（共通）、PEH・PEL（共通））の28日養生後の圧縮強度を比較として確認した。

#### (2) 動弾性係数試験（表4.1～2、図-3.1～2）

動弾性係数は圧縮強度と同様の傾向で、経年により微増であった。なお、試験前に、動弾性係数測定器校正用石質ブロック（インド産 黒御影石）（ $\phi 100 \times h200\text{mm}$ ）の動弾性係数を5回測定し、その平均値を初期値とした。

#### (3) 長さ変化試験（表5.1～2、図-4.1～2）

供試体は試験体の長手方向に収縮及び膨張をしているが、その程度は微量であることから、現段階では DEF 現象を示唆するものではない。

#### (4) 化学分析（微粉末 X 線回折）

（図-5.1.1～2、5.2.1～2）

エトリングaitは回折角度9度付近にみられるが、今回の確認試験の範囲では、通常のコンクリートの水和反応によって発生した程度と想定される。

#### (5) 偏光顕微鏡による観察

（写真-1.1～4、2.1～4、3.1～3、4.1～3）

通常のコンクリートの水和反応により生成したとみられるエトリングaitが、気泡中等に微量に確認できるが、DEF の発生を示唆するような骨材周りやセメントペースト部へのエトリングaitの集中は見られなかった。

表-2 確認試験内容

試験項目	試験方法及び目的	供試体寸法[mm]	1 配合・試験当りの供試体使用本数
圧縮強度試験	コンクリートの圧縮強度試験方法 (JIS A 1108)	$\phi 100 \times 200$ (JIS A 1132)	3本
動弾性係数試験	共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数試験法 (JIS A 1127)	$\square 100 \times 100 \times 400$	5本 (同一の供試体を使用)
長さ変化試験	コンクリートの長さ変化測定ダイヤルゲージ方法 (JIS A 1129-3)		
化学分析 (微粉末 X 線回折)	回折 X 線の回折ピークにより含まれる物質の同定を行う	$\square 50 \times 50 \times 30$ の試験片を微粉化	1本 $\square 100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体から、50mm程度切り取り、 $\square 50 \times 50$ に4分割する。
偏光顕微鏡による観察	偏光顕微鏡でコンクリート内部を観察する	$\square 50 \times 50 \times 20$ の試験片から、 $\square 20 \times 30$ のプレパラート作成	

表-3.1 圧縮強度試験結果（プレキャスト製品供試体）

種別	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント 種類	水セメン ト比 W/C (%)	養生	供試体 記号	圧縮強度 F <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
						材齢28日	材齢378日
						2018年11月27日	2019年11月12日
PH	24	普通 ポルトランド セメント	52	蒸気養生 最高温度 90℃  継続時間 12時間	1	25.4	33.5
					2	26.9	34.7
					3	26.2	34.6
					平均値	26.2	34.3
PL				蒸気養生 最高温度 65℃  継続時間 4時間	1	35.7	46.3
					2	36.0	44.5
					3	35.9	46.2
					平均値	35.9	45.7
PH・PL (共通)				水中養生 温度20℃	1	44.9	—
					2	43.7	—
					3	43.2	—
					平均値	43.9	—
種別	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント 種類	水セメン ト比 W/C (%)	養生	供試体 記号	圧縮強度 F <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
						材齢28日	材齢376日
						2018年11月29日	2019年11月12日
PEH	36	普通エコ セメント	40	蒸気養生 最高温度 90℃  継続時間 12時間	1	39.1	47.1
					2	39.4	48.5
					3	39.4	48.9
					平均値	39.3	48.2
PEL				蒸気養生 最高温度 50℃  継続時間 4時間	1	53.2	65.1
					2	53.9	64.0
					3	56.8	64.2
					平均値	54.6	64.4
PEH・PEL (共通)				水中養生 温度20℃	1	61.4	—
					2	64.0	—
					3	64.2	—
					平均値	63.2	—

表-3.2 圧縮強度試験結果（マスコンクリート供試体）

種別	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント 種類	水粉体比 W/B(%)	養生	供試体 記号	圧縮強度 F <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
						材齢28日	材齢441日
						2019年7月12日	2020年8月28日
M a	24	低熱 ポルトランド セメント	51.5	温度履歴 最高温度 70℃  継続時間 24時間	1	45.7	48.7
					2	44.8	46.2
					3	44.3	48.4
					平均値	44.9	47.8
M b	24	低発熱 高炉B種	51.5	温度履歴 最高温度 70℃  継続時間 24時間	1	32.0	43.5
					2	31.9	44.3
					3	32.1	45.1
					平均値	32.0	44.3
N	24	普通 ポルトランド セメント	51.5	最高温度 87℃  継続時間 24時間	1	32.9	36.3
					2	33.9	36.1
					3	33.3	35.2
					平均値	33.4	35.9

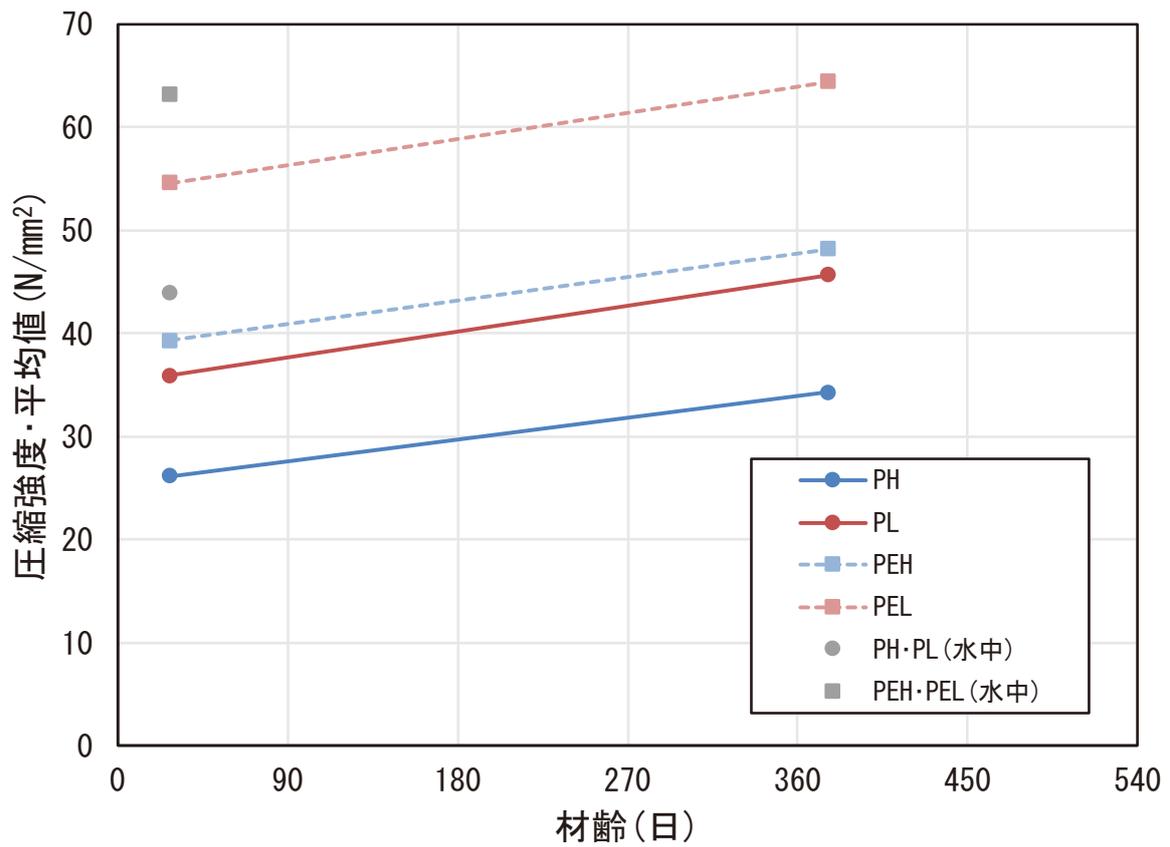


図-2.1 供試体材齢と圧縮強度の関係（プレキャスト製品供試体）

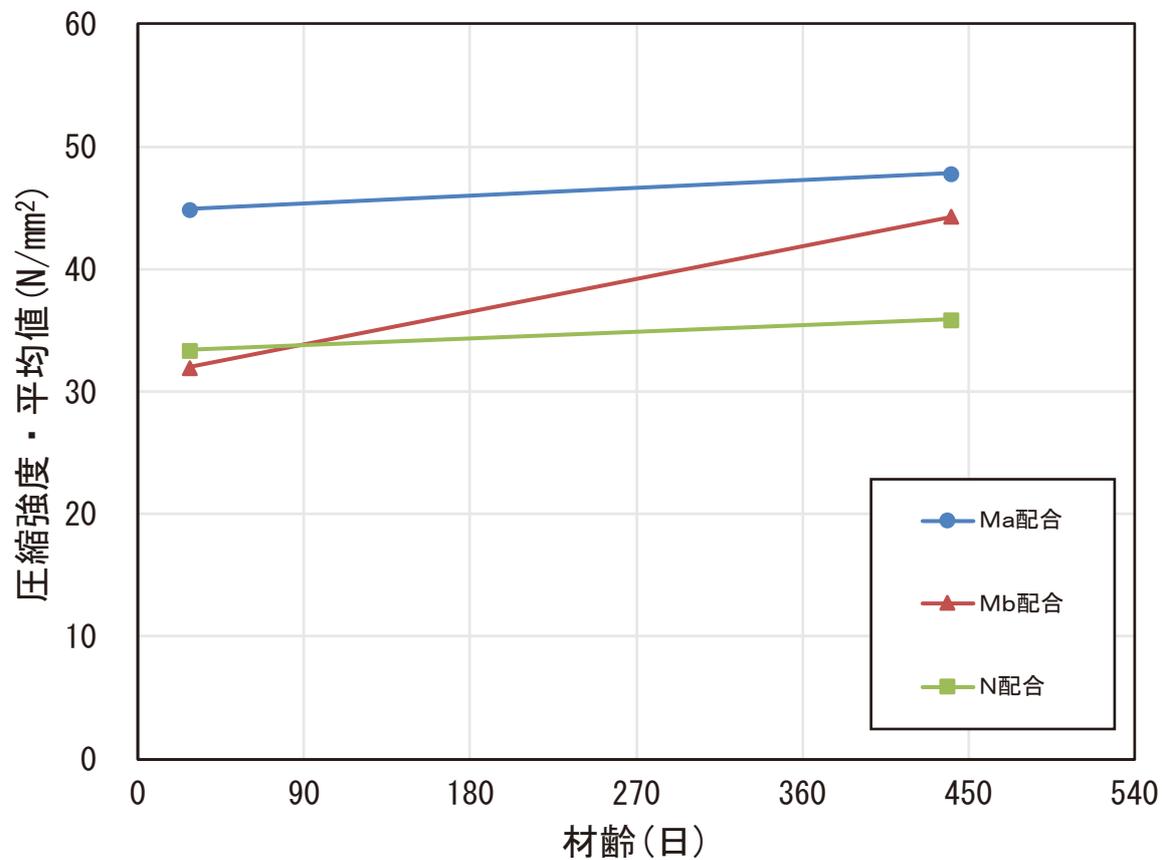


図-2.2 供試体材齢と圧縮強度の関係（マスコンクリート供試体）

表-4.1 動弾性係数試験結果（プレキャスト製品供試体）

種別	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント 種類	水セメ ント比 W/C (%)	養生	記号	動弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		
						材齢28日	材齢56日	材齢378日
						2018年11月27日	2018年12月25日	2019年11月12日
P H	24	普通 ポルランド セメント	52	蒸気養生 最高温度 90 °C  継続時間 12 時間	1	34.3	36.0	38.5
					2	34.5	36.0	38.5
					3	35.6	37.2	39.9
					4	35.8	37.3	40.6
					5	35.5	36.9	40.0
					平均値	35.1	36.7	39.5
P L	24	普通 ポルランド セメント	52	蒸気養生 最高温度 65 °C  継続時間 4 時間	1	38.8	40.1	42.1
					2	37.3	38.9	41.4
					3	37.1	38.7	41.2
					4	37.4	39.0	41.2
					5	37.6	39.0	40.5
					平均値	37.6	39.1	41.3
種別	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント 種類	水セメ ント比 W/C (%)	養生	記号	動弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		
						材齢28日	材齢56日	材齢376日
						2018年11月29日	2018年12月27日	2019年11月12日
P E H	36	普通エコ セメント	40	蒸気養生 最高温度 90 °C  継続時間 12 時間	1	37.0	38.1	40.8
					2	36.7	37.8	41.8
					3	39.4	40.4	40.6
					4	39.3	40.6	41.3
					5	39.4	40.5	41.1
					平均値	38.4	39.5	41.1
P E L	36	普通エコ セメント	40	蒸気養生 最高温度 50 °C  継続時間 4 時間	1	41.9	43.0	47.3
					2	40.8	41.8	46.3
					3	39.9	41.0	45.3
					4	40.9	42.2	47.0
					5	41.3	42.3	45.5
					平均値	41.0	42.1	46.3

表-4.2 動弾性係数試験結果（マスコンクリート供試体）

種別	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント 種類	水粉体比 W/B(%)	養生	供試体 記号	動弾性係数 E <sub>D</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )		
						材齢28日	材齢56日	材齢441日
						2019年7月12日	2019年8月9日	2020年8月28日
M a	24	低熱 ポルトランド セメント	51.5	温度履歴 最高温度 70℃  継続時間 24時間	Ma-1	37.5	38.2	40.3
					Ma-2	38.9	38.3	41.3
					Ma-3	37.9	38.1	40.8
					Ma-4	36.0	36.5	41.2
					Ma-5	35.8	37.6	40.8
					平均値	37.2	37.7	40.9
M b	24	低発熱 高炉B種	51.5	温度履歴 最高温度 70℃  継続時間 24時間	Mb-1	37.8	36.9	40.7
					Mb-2	39.1	37.3	40.6
					Mb-3	36.1	34.4	40.7
					Mb-4	36.7	37.2	40.7
					Mb-5	38.5	37.8	41.8
					平均値	37.6	36.7	40.9
N	24	普通 ポルトランド セメント	51.5	最高温度 87℃  継続時間 24時間	N-1	34.3	35.2	36.7
					N-2	32.8	35.4	36.4
					N-3	33.4	33.8	36.6
					N-4	33.2	36.5	37.5
					N-5	33.4	35.5	36.4
					平均値	33.4	35.3	36.7

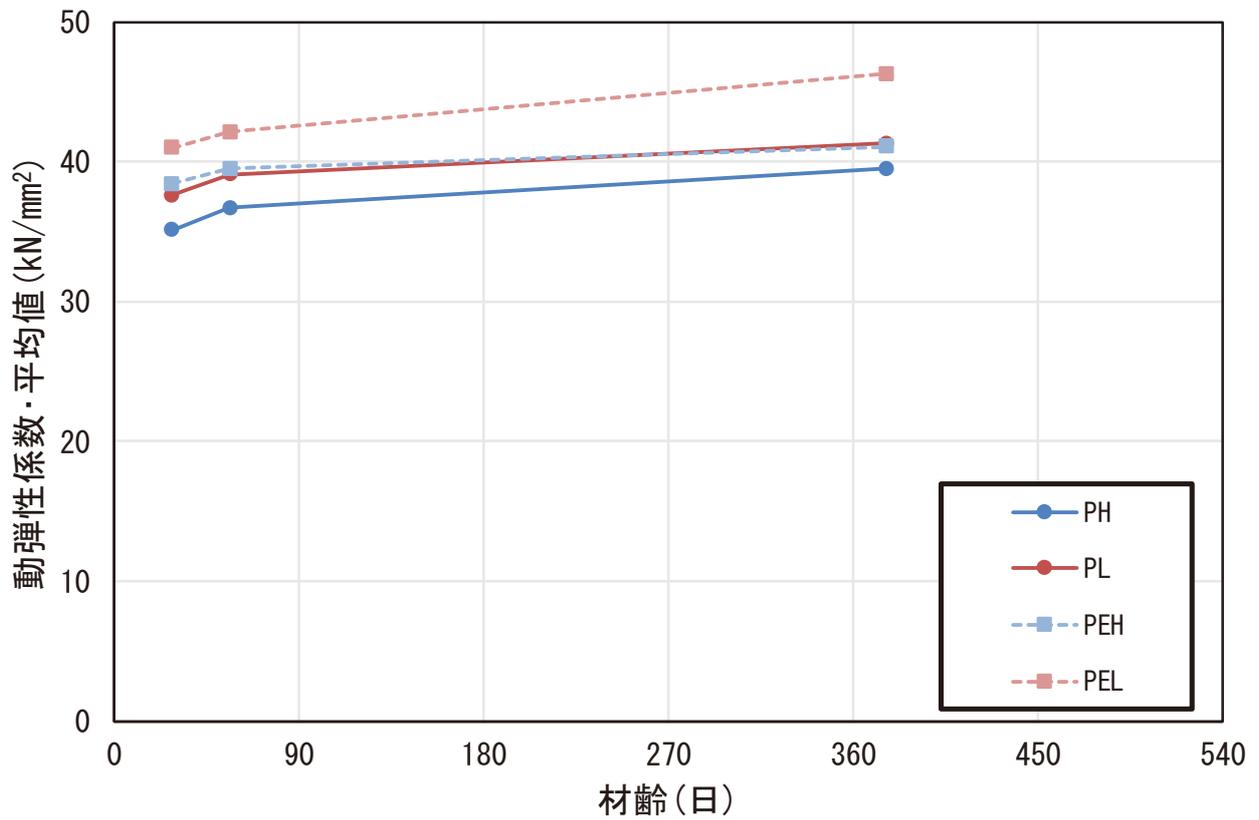


図-3.1 供試体材齢と動弾性係数の関係（プレキャスト製品供試体）

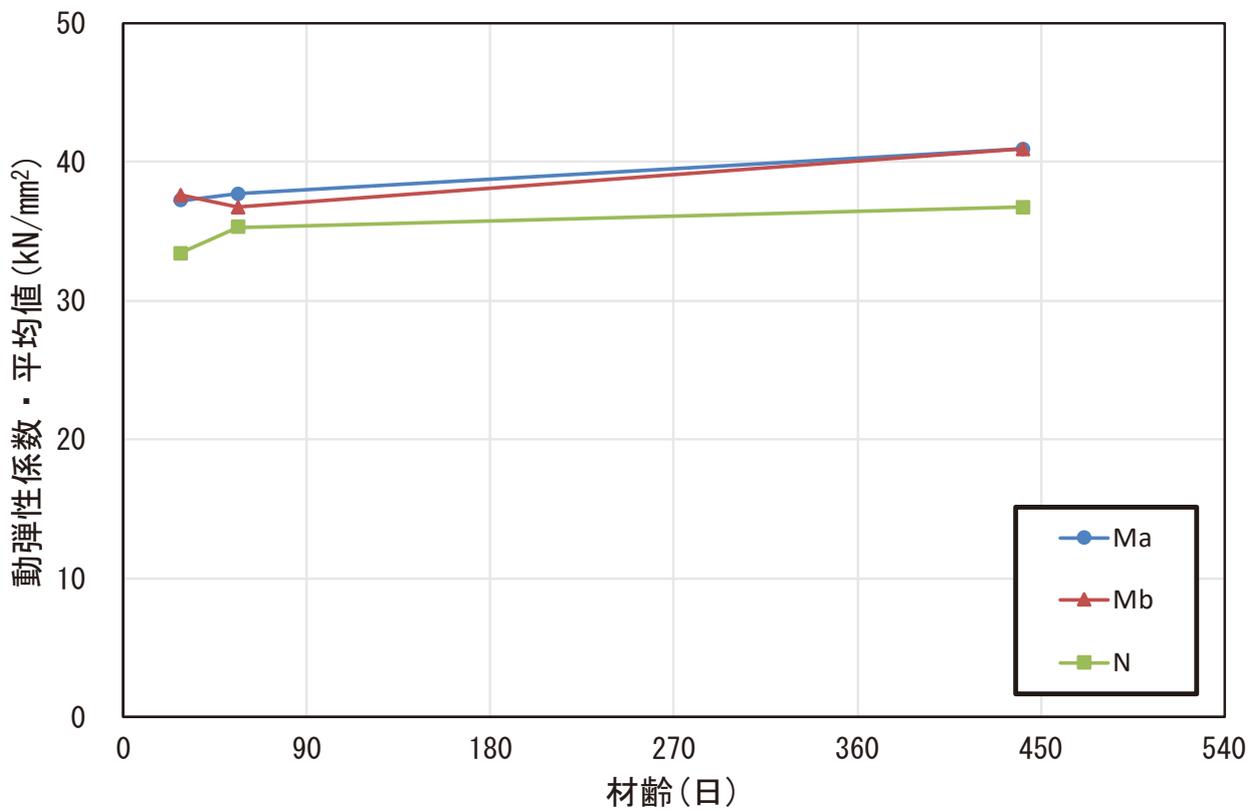


図-3.2 供試体材齢と動弾性係数の関係（マスコンクリート供試体）

表-5.1 長さ変化試験結果（プレキャスト製品供試体）

種別	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント 種類	水セメ ント比 W/C (%)	養生	記号	長さ変化率 (×10 <sup>-6</sup> )		
						材齢28日	材齢56日	材齢378日
						2018年11月27日	2018年12月25日	2019年11月12日
P H	24	普通 ポルトランド セメント	52	蒸気養生 最高温度 90 °C  継続時間 12 時間	平均値	8	5	2
					2	3	-3	-11
					3	11	11	-22
					4	11	6	50
					5	8	6	-28
					平均値	8	5	2
P L	24	普通 ポルトランド セメント	52	蒸気養生 最高温度 65 °C  継続時間 4 時間	平均値	4	2	9
					2	8	8	11
					3	11	8	25
					4	0	0	3
					5	3	0	19
					平均値	5	4	9
種別	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント 種類	水セメ ント比 W/C (%)	養生	記号	長さ変化率 (×10 <sup>-6</sup> )		
						材齢28日	材齢56日	材齢376日
						2018年11月29日	2018年12月27日	2019年11月12日
P E H	36	普通エコ セメント	40	蒸気養生 最高温度 90 °C  継続時間 12 時間	1	28	31	19
					2	28	30	17
					3	28	33	8
					4	22	25	-3
					5	25	31	3
					平均値	26	30	9
P E L	36	普通エコ セメント	40	蒸気養生 最高温度 50 °C  継続時間 4 時間	1	3	8	-31
					2	3	8	-36
					3	3	6	-42
					4	3	11	-33
					5	6	6	-50
					平均値	4	8	-38

※長さ変化率の基長は、2018年11月6日（材齢7日）に測定を行った。

表-5.2 長さ変化試験結果（マスコンクリート供試体）

種別	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント 種類	水粉体比 W/B (%)	養生	供試体 記号	長さ変化率 (×10 <sup>-6</sup> )	
						材齢56日	材齢441日
						2019年8月9日	2020年8月28日
M a	24	低熱 ポルトランド セメント	51.5	温度履歴 最高温度 70℃  継続時間 24時間	Ma-1	-86	19
					Ma-2	-78	25
					Ma-3	-84	20
					Ma-4	-92	17
					Ma-5	-77	22
					平均値	-83	21
M b	24	低発熱 高炉B種	51.5	温度履歴 最高温度 70℃  継続時間 24時間	Mb-1	-64	56
					Mb-2	-53	72
					Mb-3	-59	61
					Mb-4	-61	53
					Mb-5	-56	56
					平均値	-59	60
N	24	普通 ポルトランド セメント	51.5	最高温度 87℃  継続時間 24時間	N-1	-75	28
					N-2	-78	39
					N-3	-81	39
					N-4	-81	42
					N-5	-81	25
					平均値	-79	35

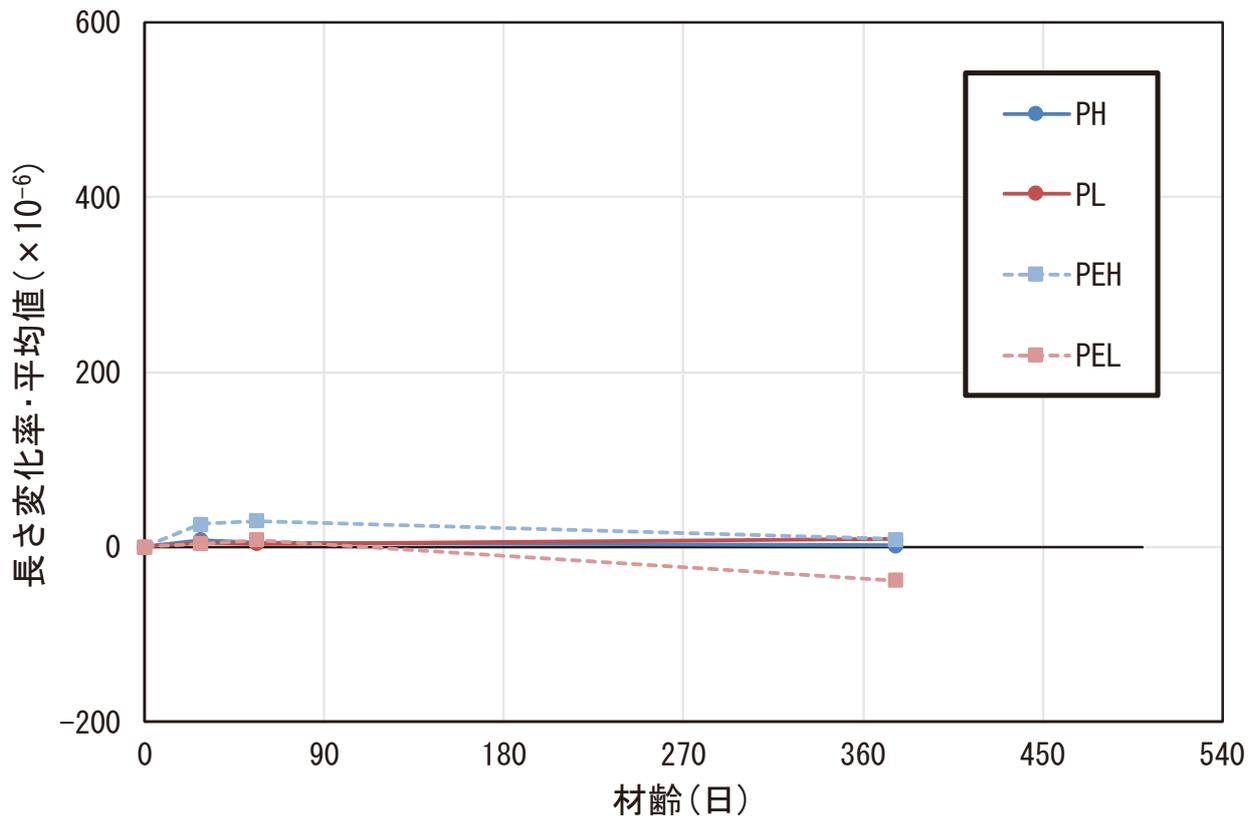


図-4.1 供試体材齢と長さ変化率の関係（プレキャスト製品供試体）

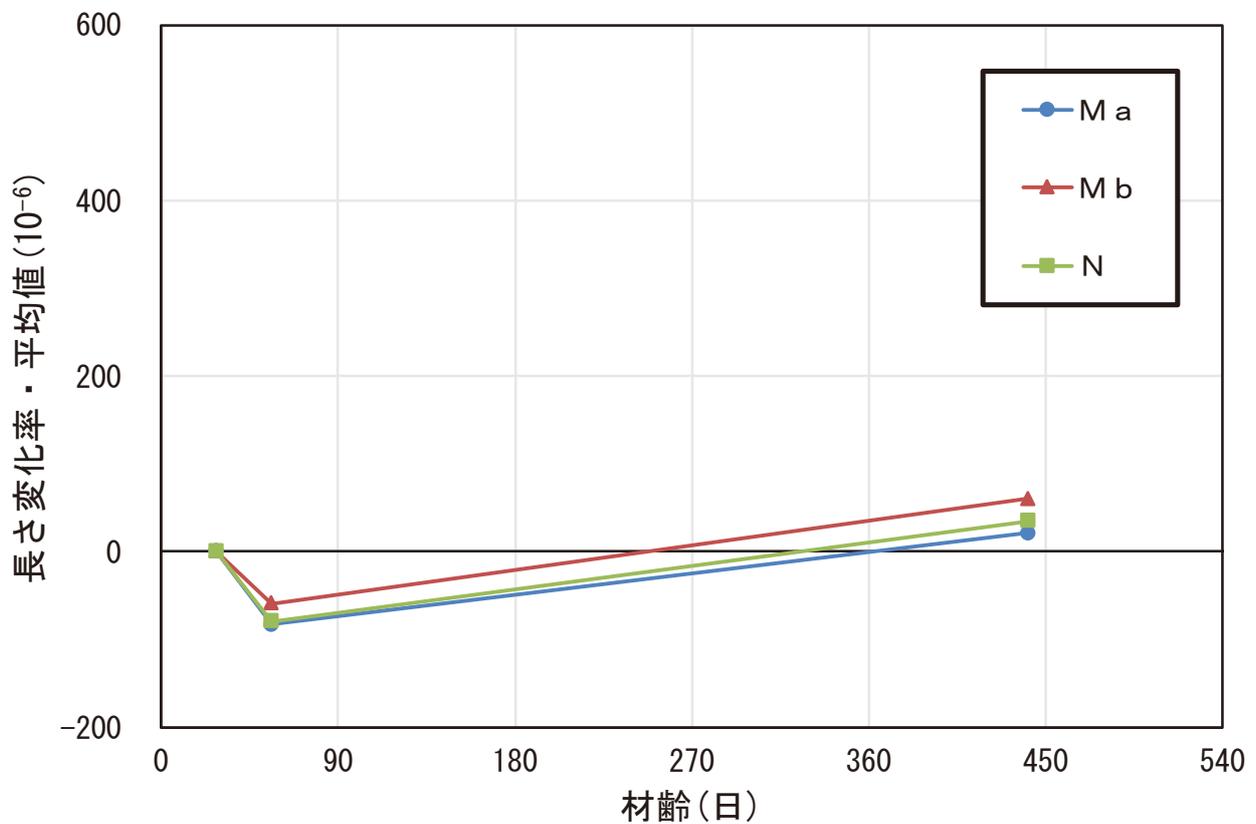


図-4.2 供試体材齢と長さ変化率の関係（マスコンクリート供試体）

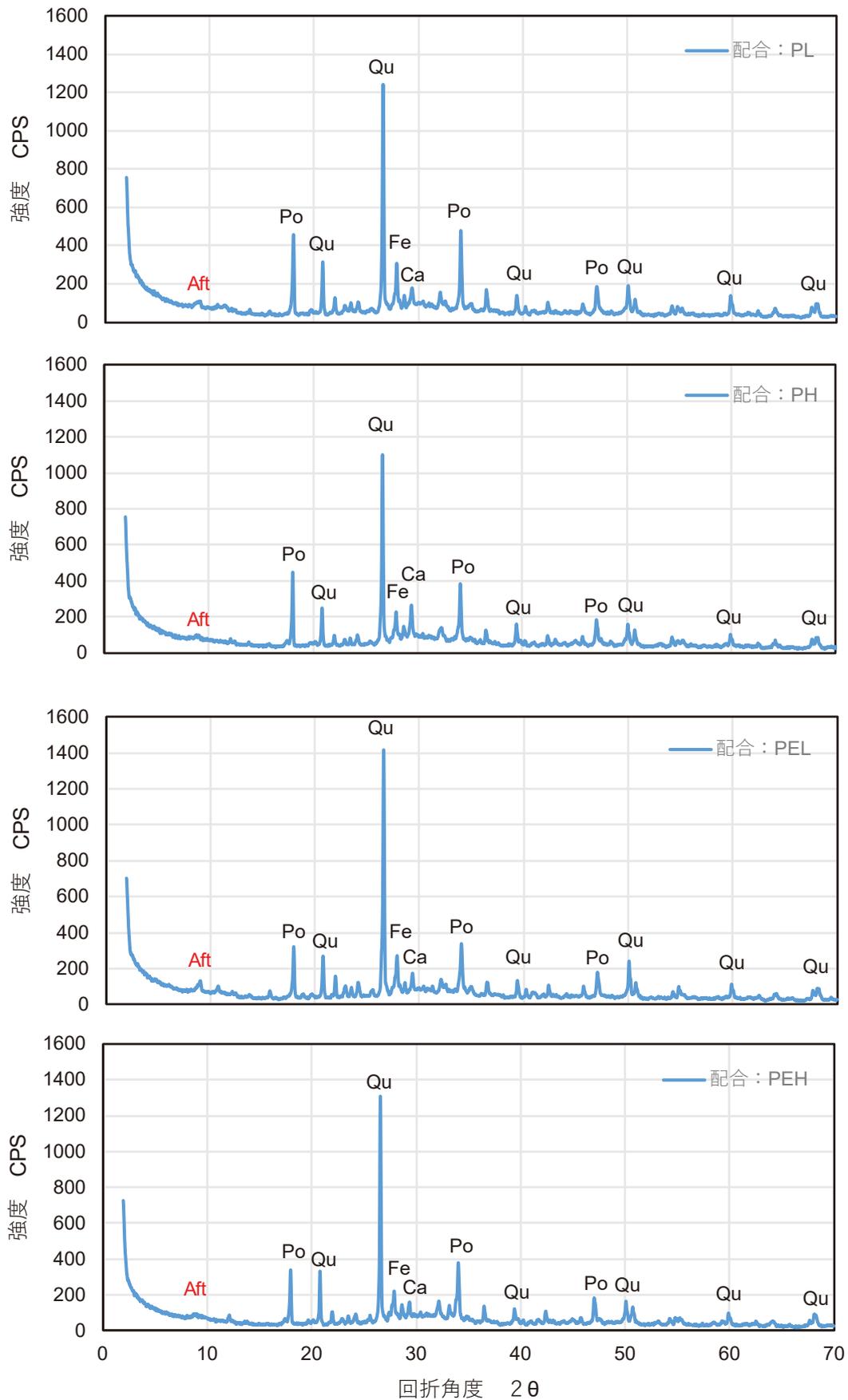


図-5.1.1 XRD 分析試験結果（プレキャスト製品供試体）（養生28日経過）

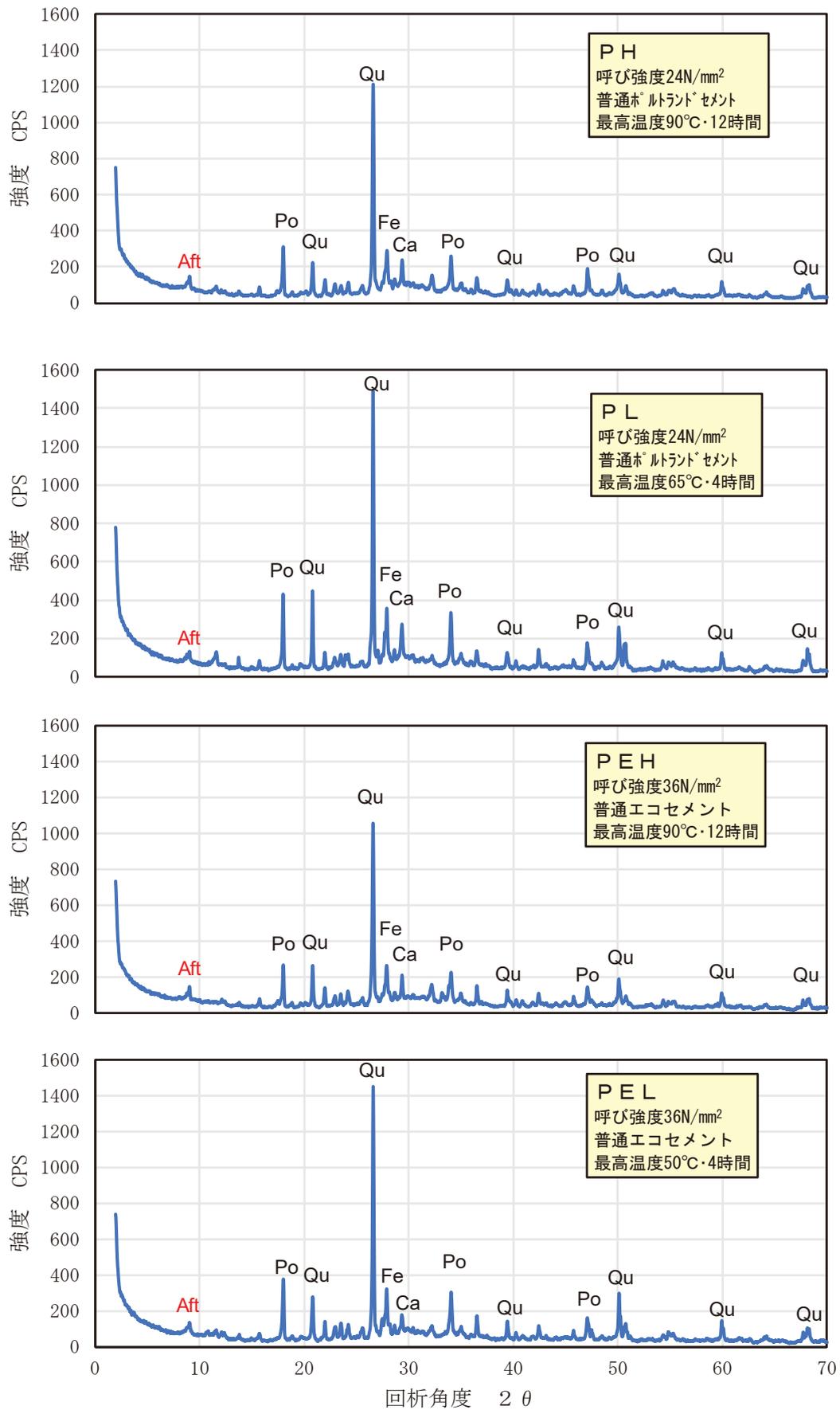
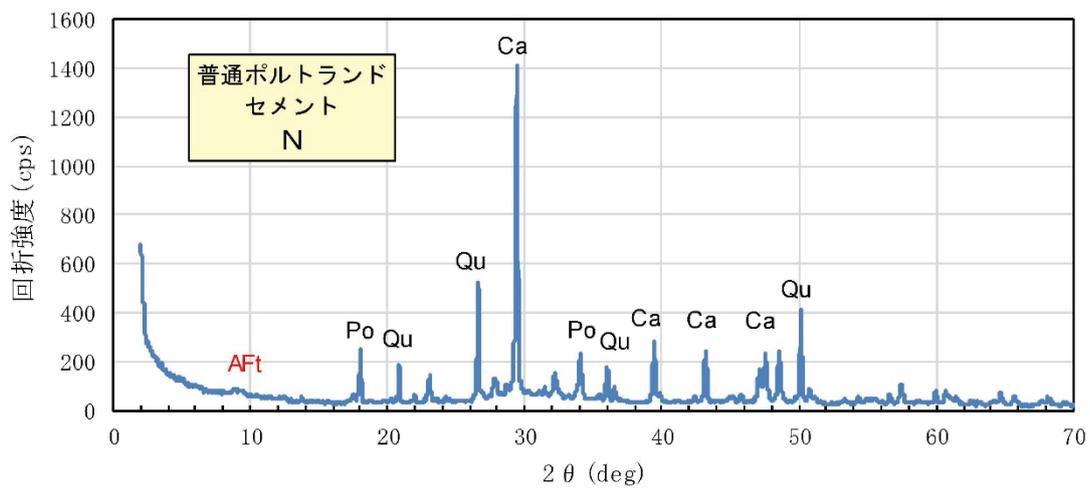
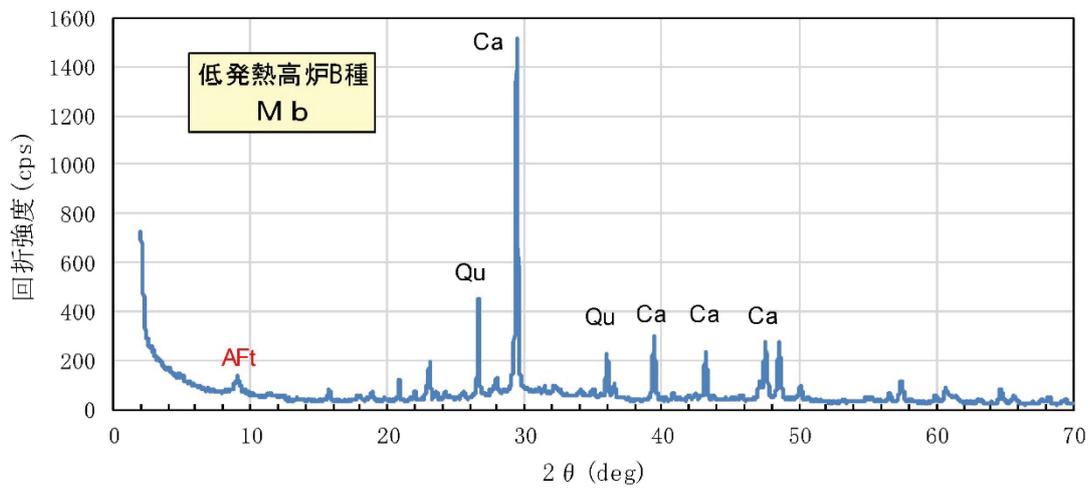
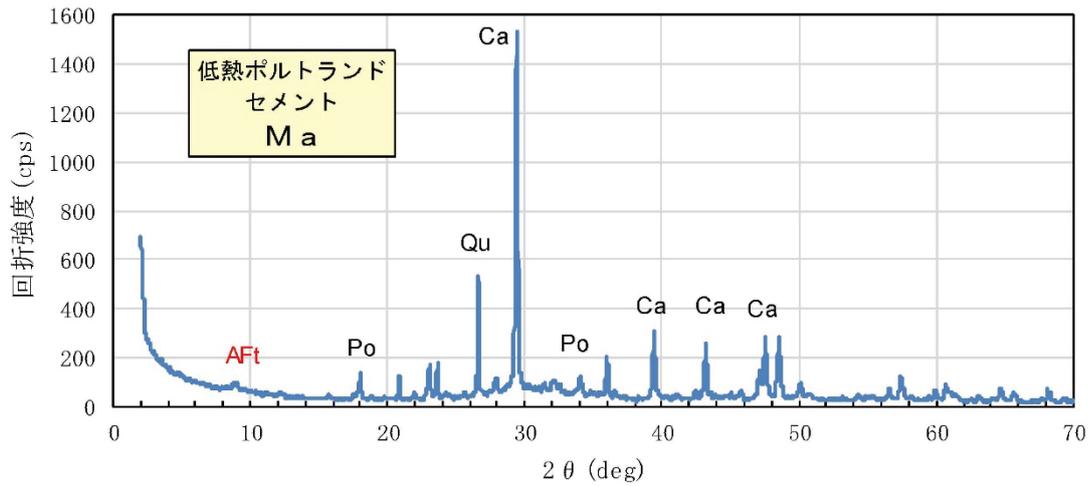
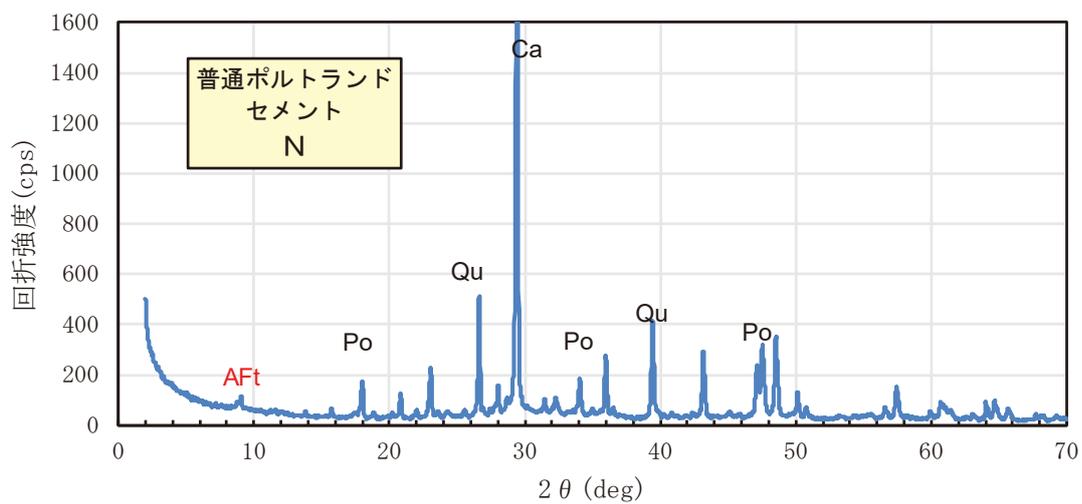
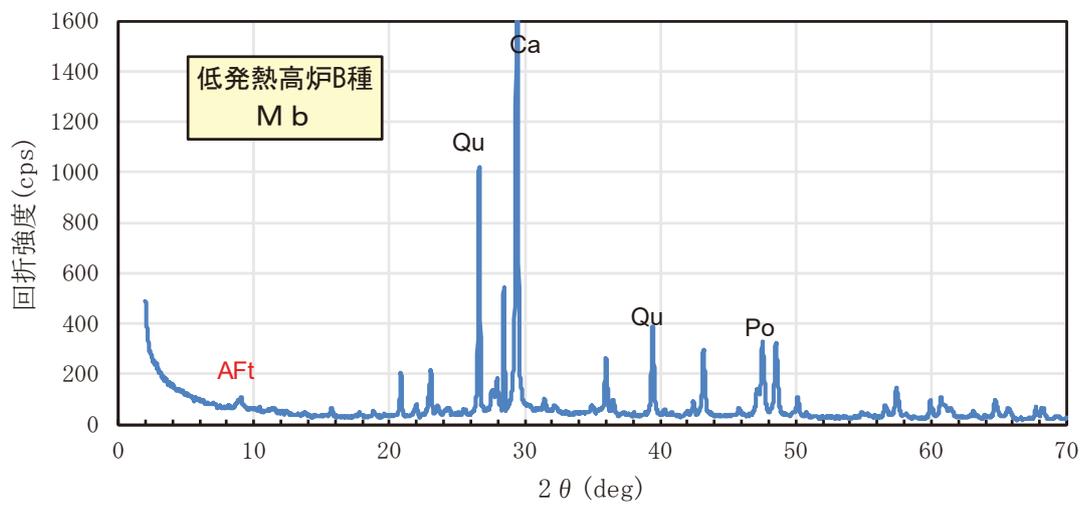
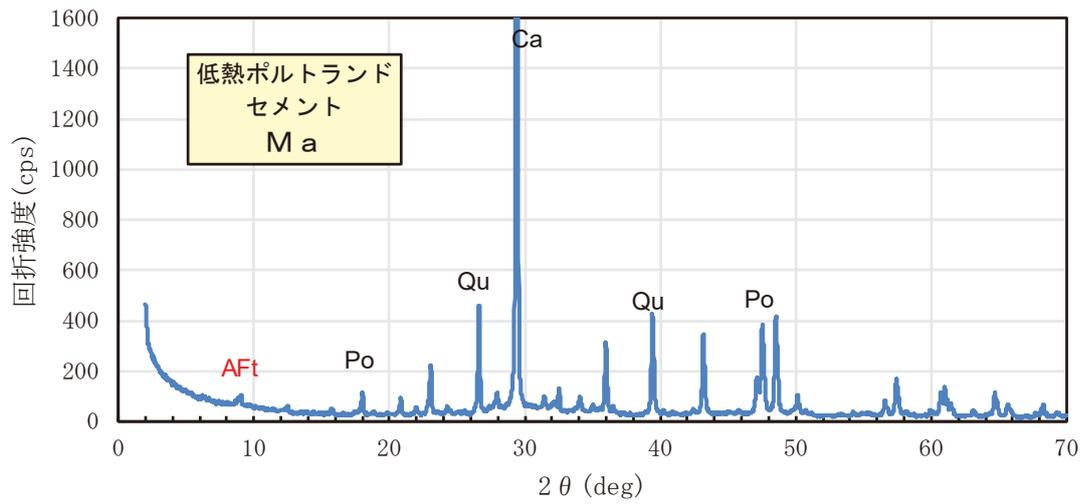


図-5.1.2 XRD 分析試験結果（プレキャスト製品供試体）（養生1年経過）



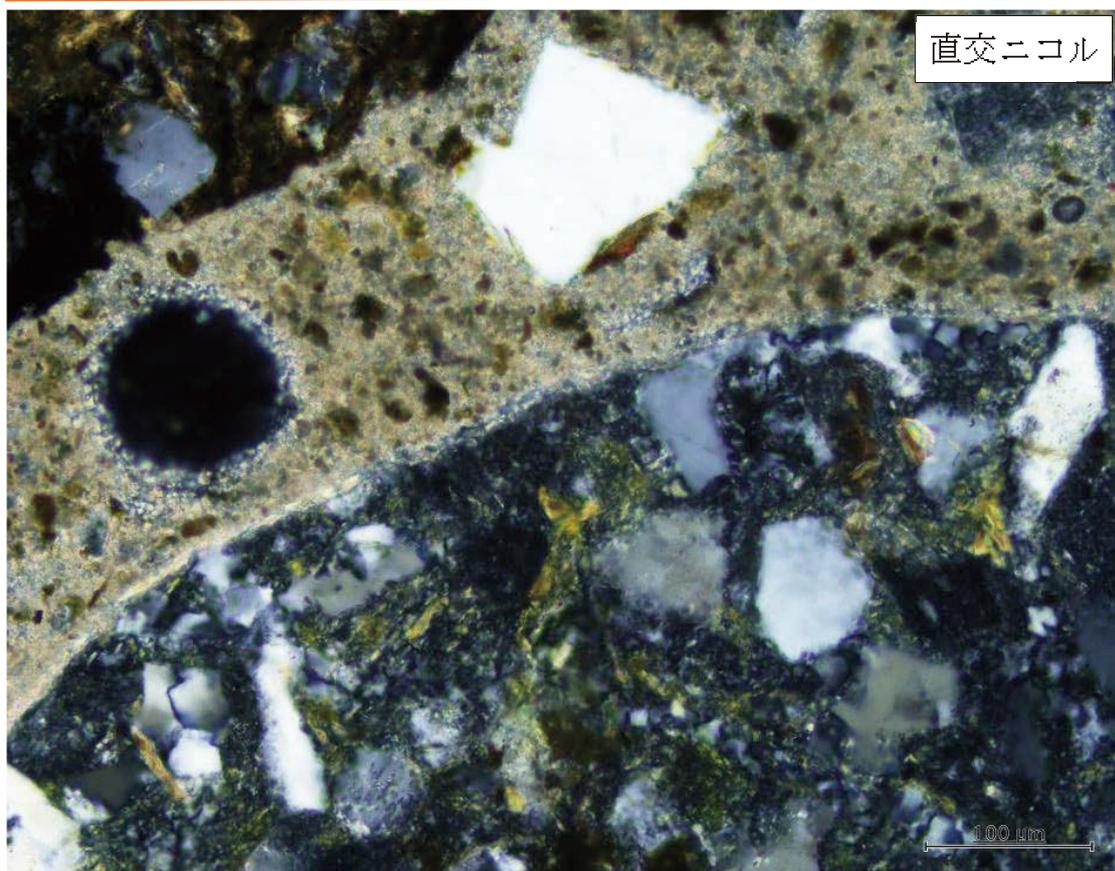
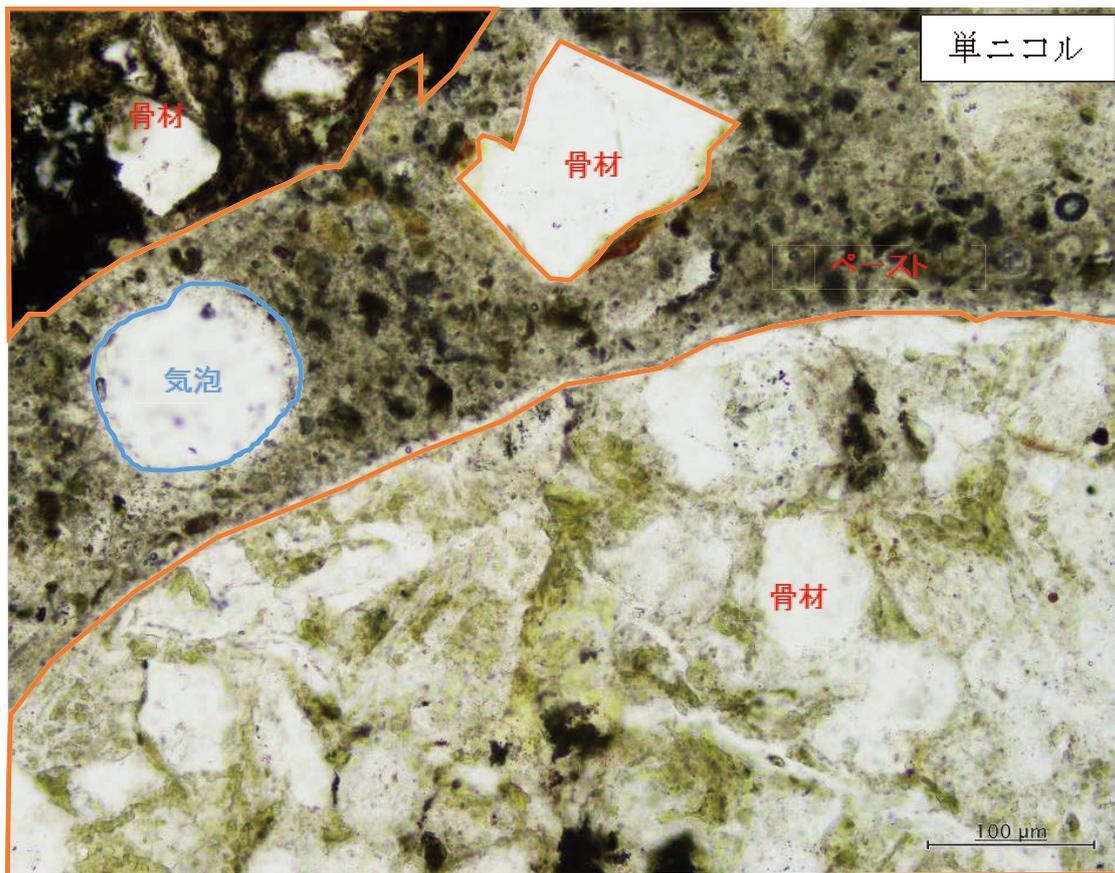
Qu	石英
Ca	方解石
Po	水酸化カルシウム
AFt	エトリンガイト

図-5.2.1 XRD 分析試験結果 (マスコンクリート供試体) (養生 28 日経過)



Qu	石英
Ca	方解石
Po	水酸化カルシウム
AFt	エトリンガイト

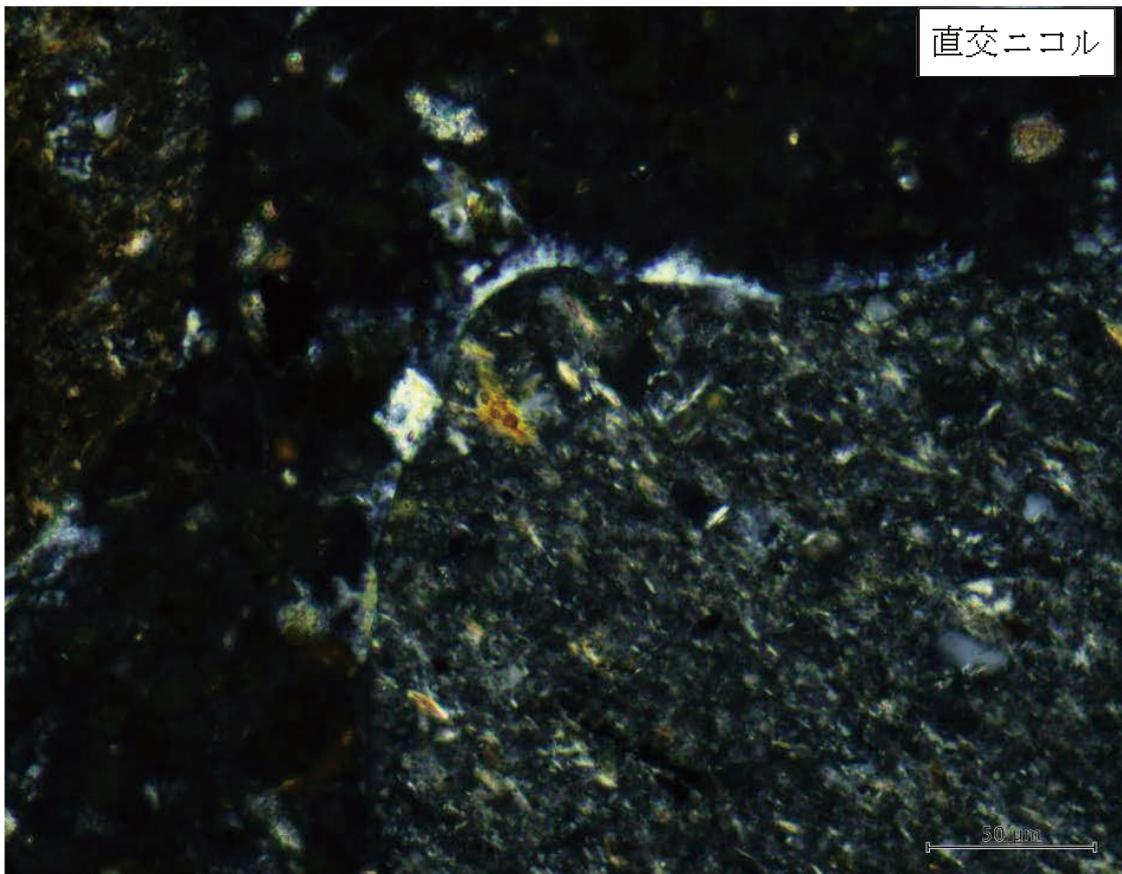
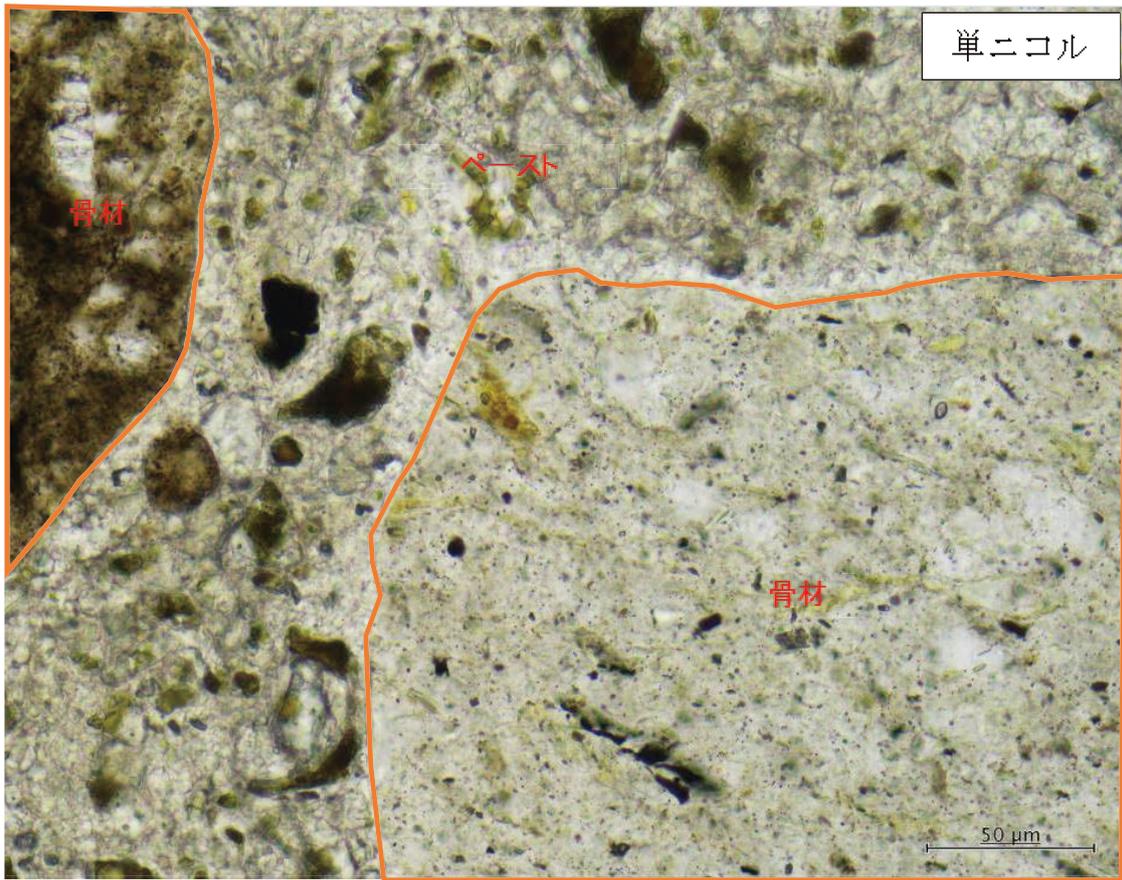
図-5.2.2 XRD 分析試験結果 (マスコンクリート供試体) (養生1年経過)



0.1 mm

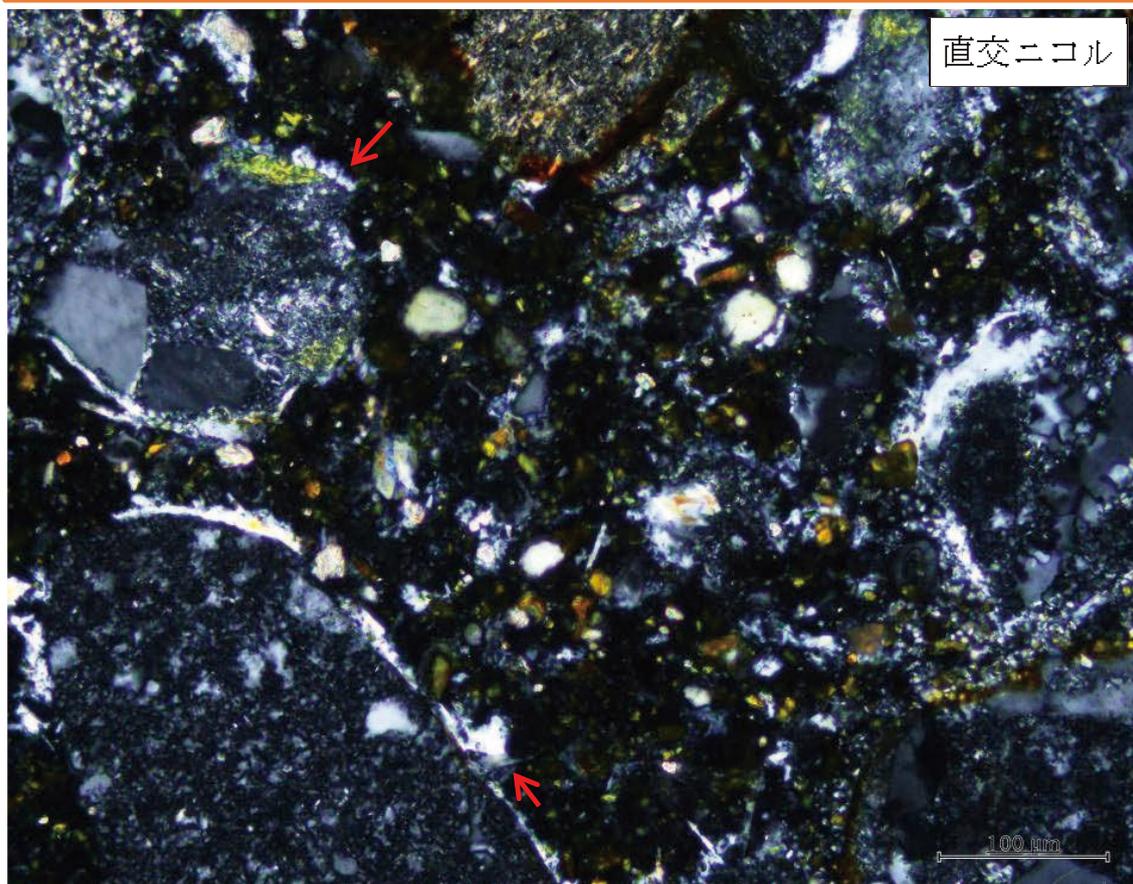
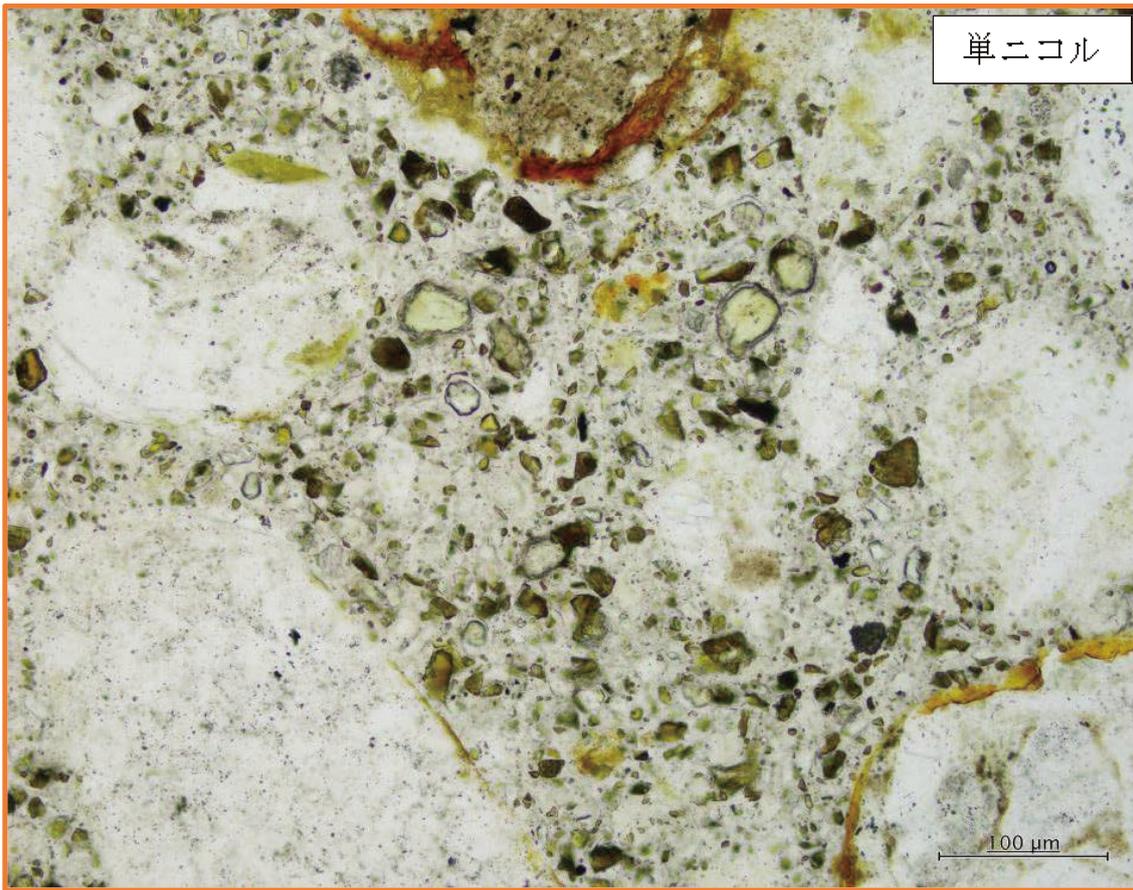
↔

写真-1.1 偏光顕微鏡観察（プレキャスト製品供試体）（養生 28 日経過）【PH 供試体】



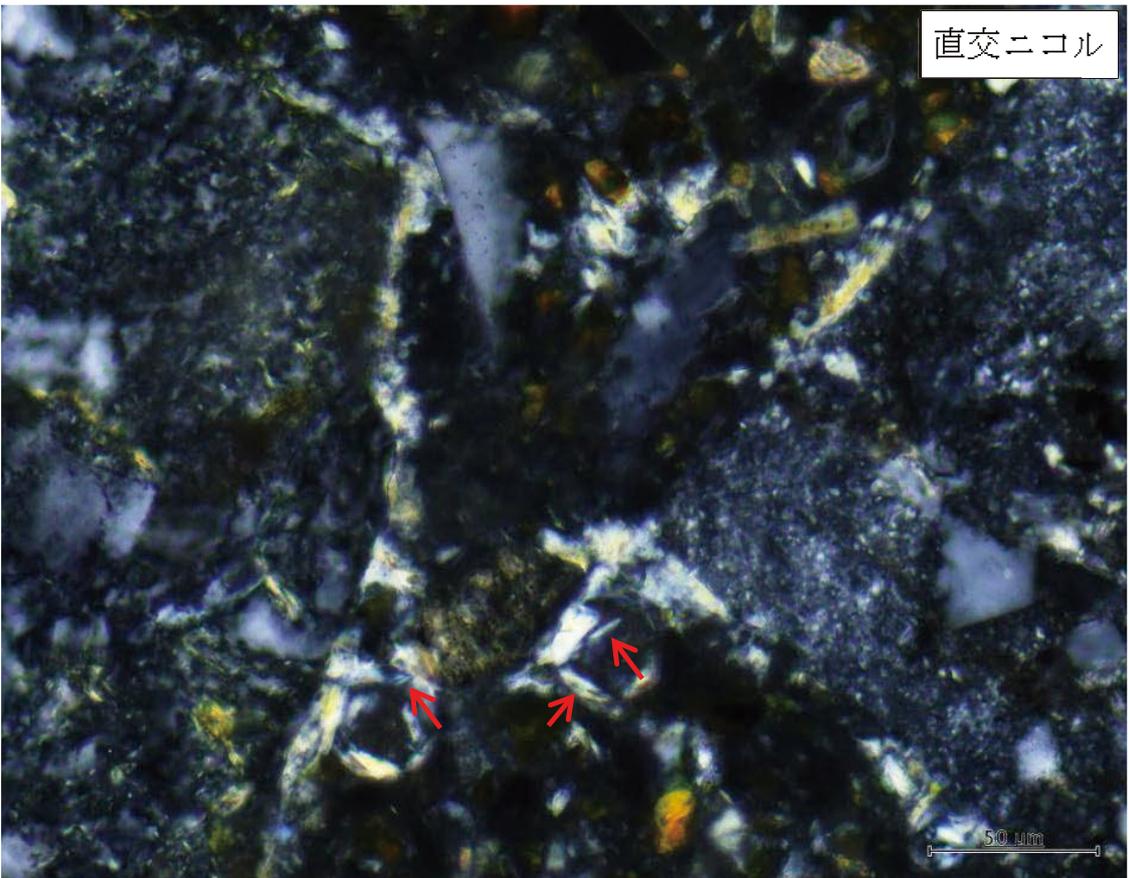
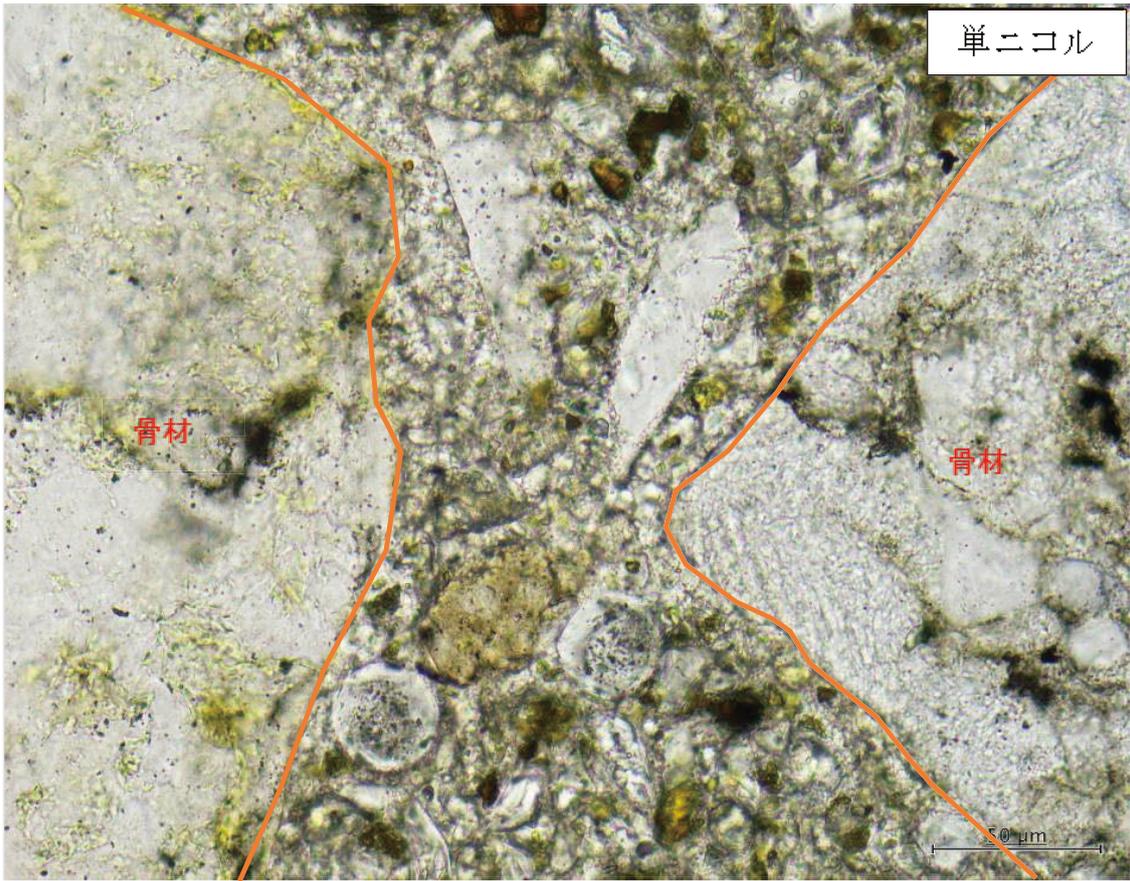
0.1 mm

写真-1.2 偏光顕微鏡観察（プレキャスト製品供試体）（養生 28 日経過）【PL 供試体】



0.1mm

写真-1.3 偏光顕微鏡観察（プレキャスト製品供試体）（養生 28 日経過）【PEH 供試体】



0.1mm

写真-1.4 偏光顕微鏡観察（プレキャスト製品供試体）（養生 28 日経過）【PEL 供試体】

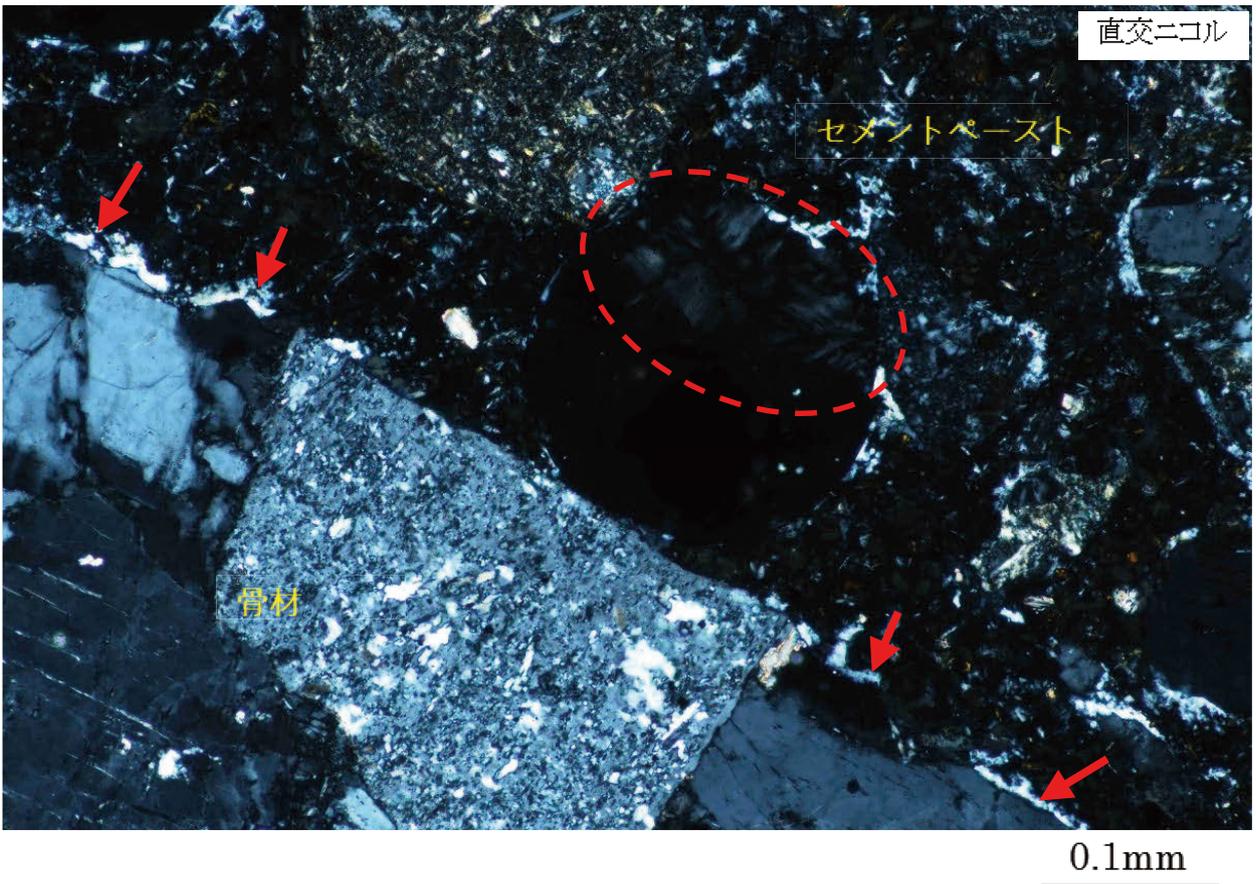
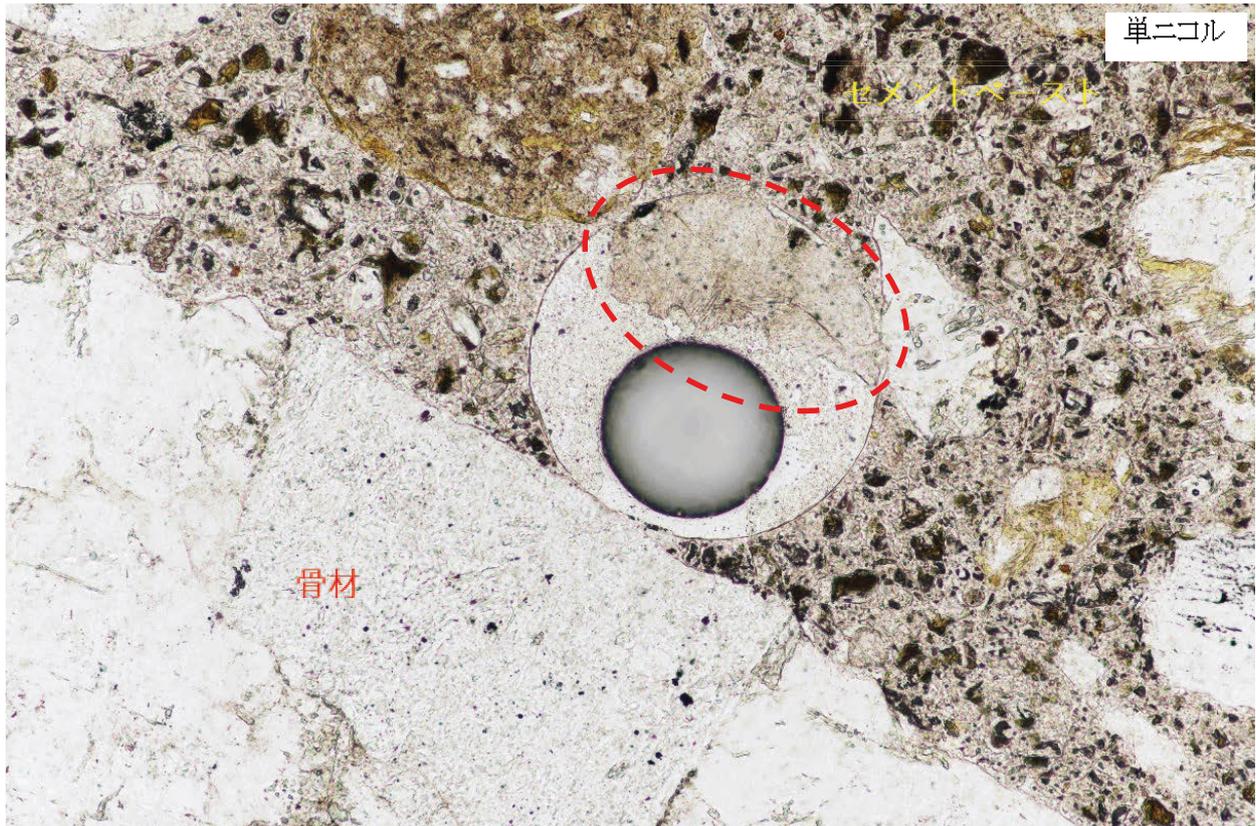
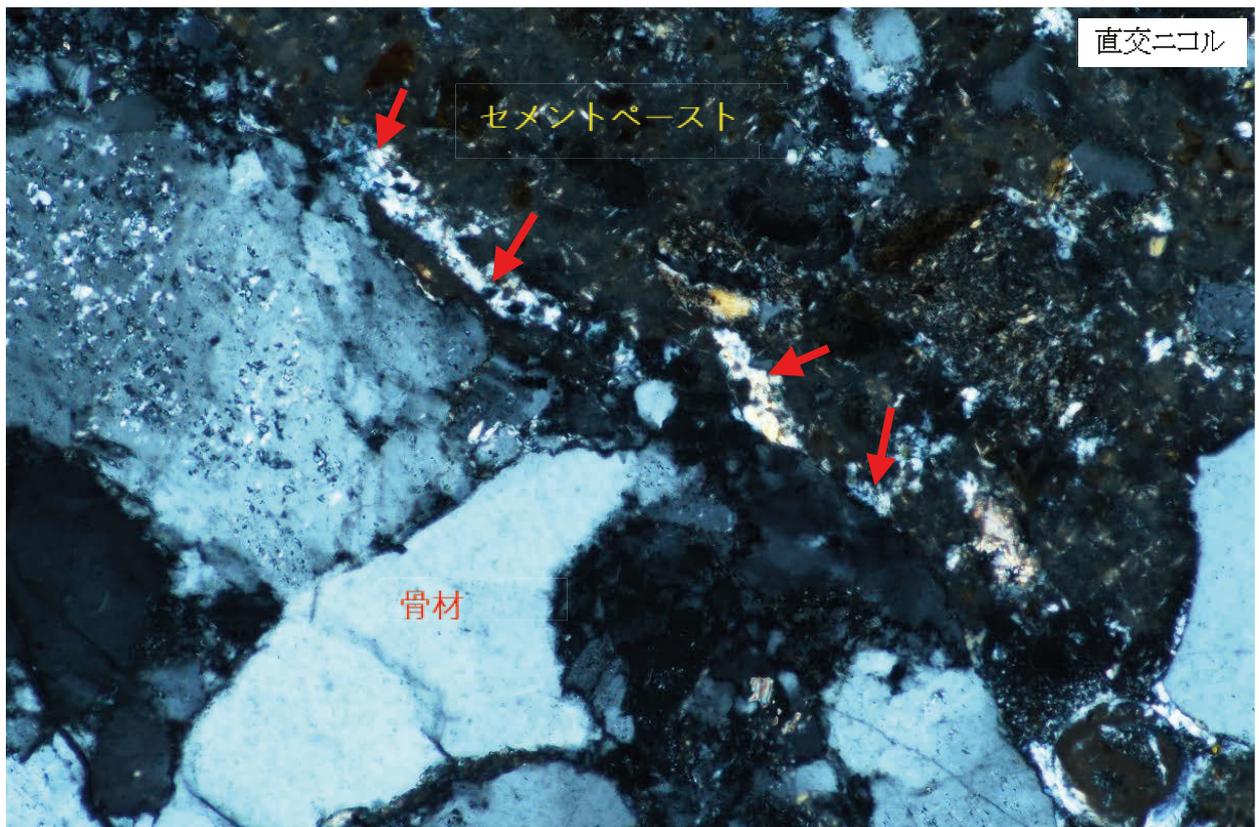
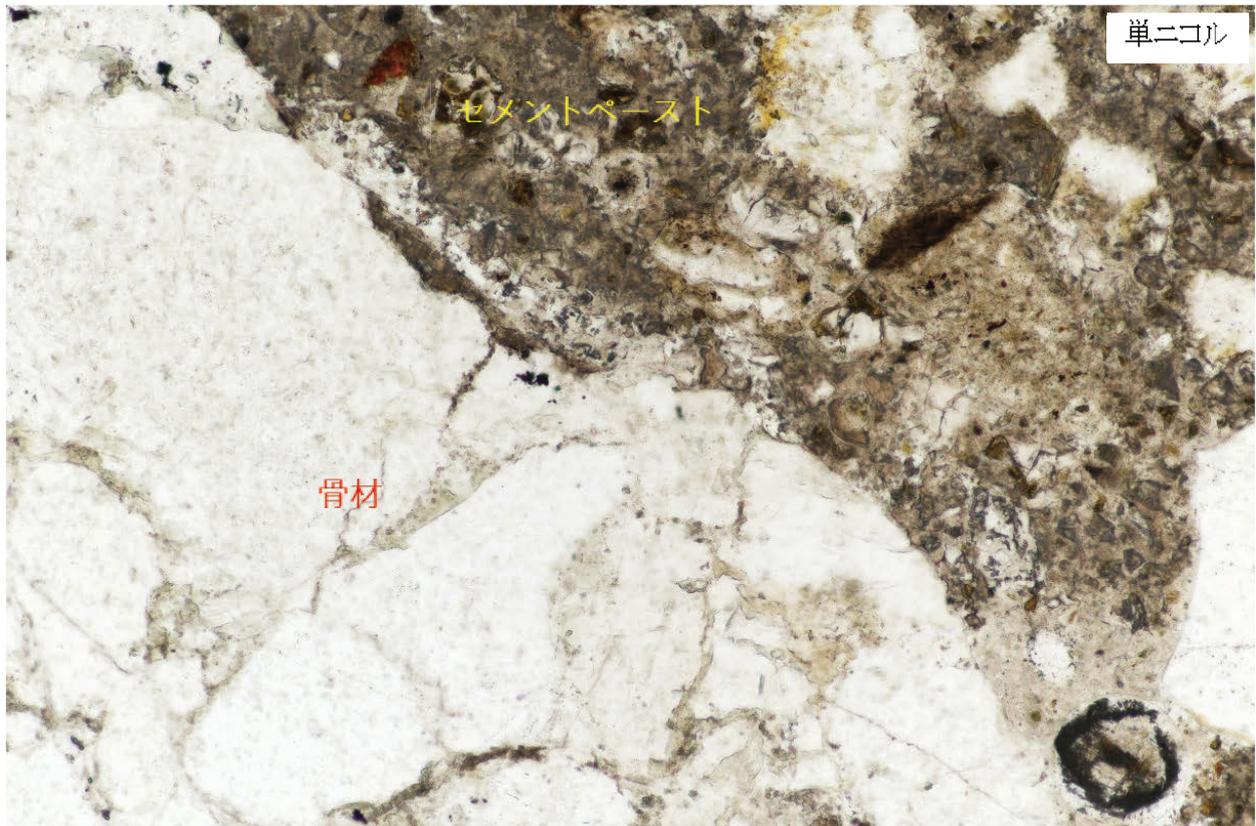
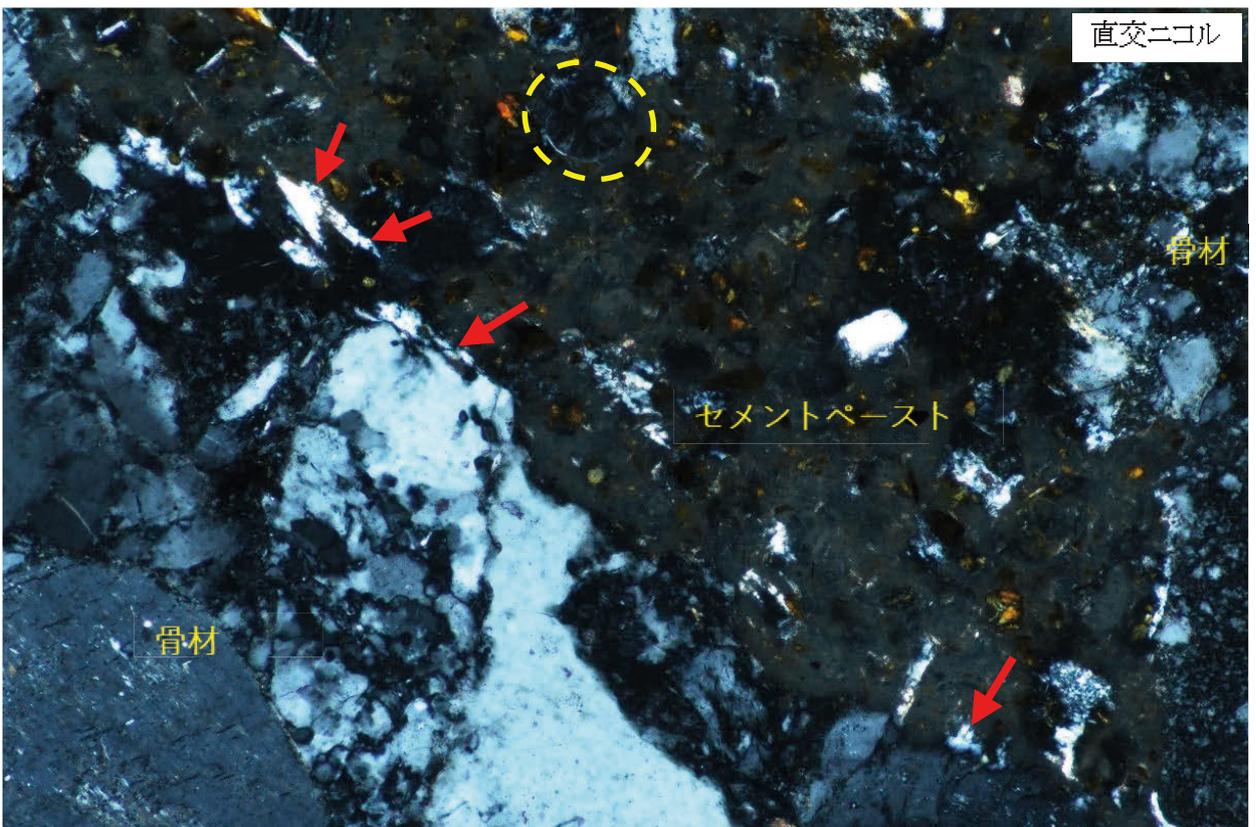
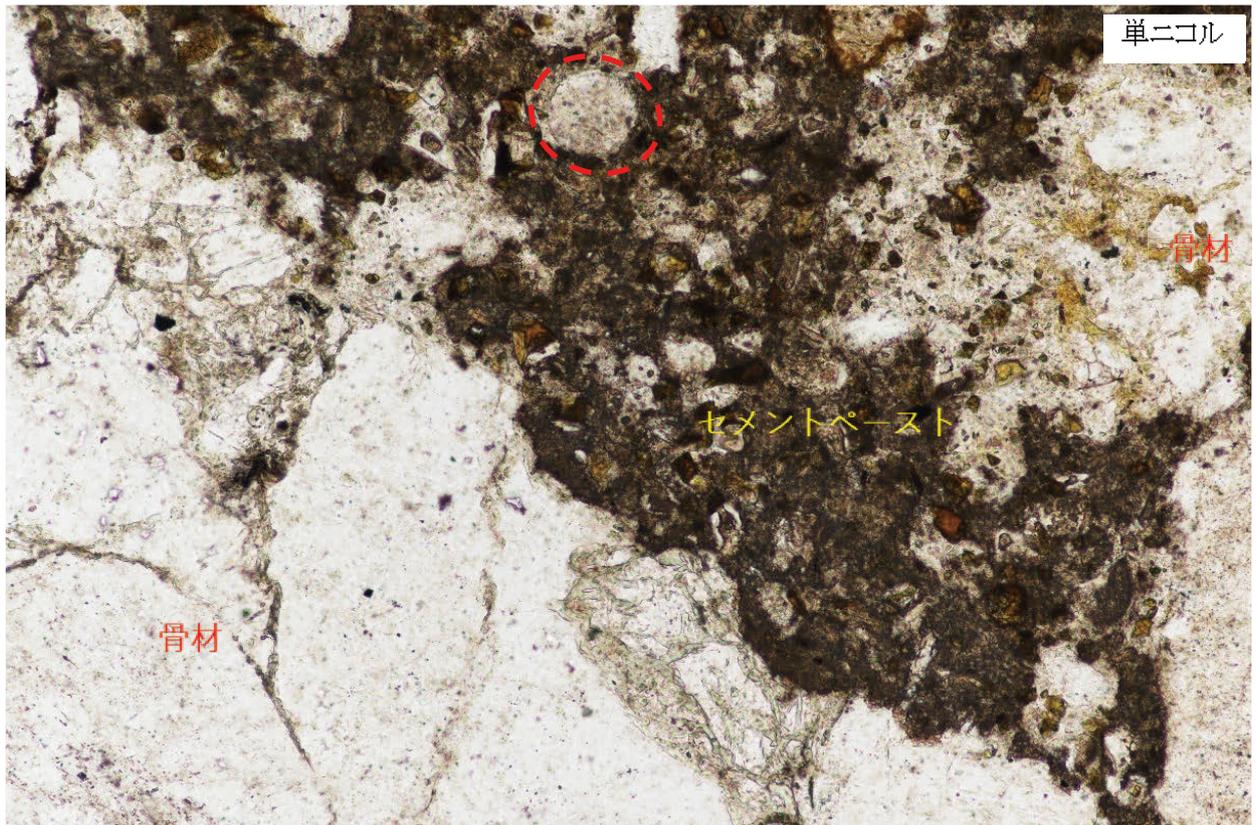


写真-2.1 偏光顕微鏡観察（プレキャスト製品供試体）（養生1年経過）（PH供試体）



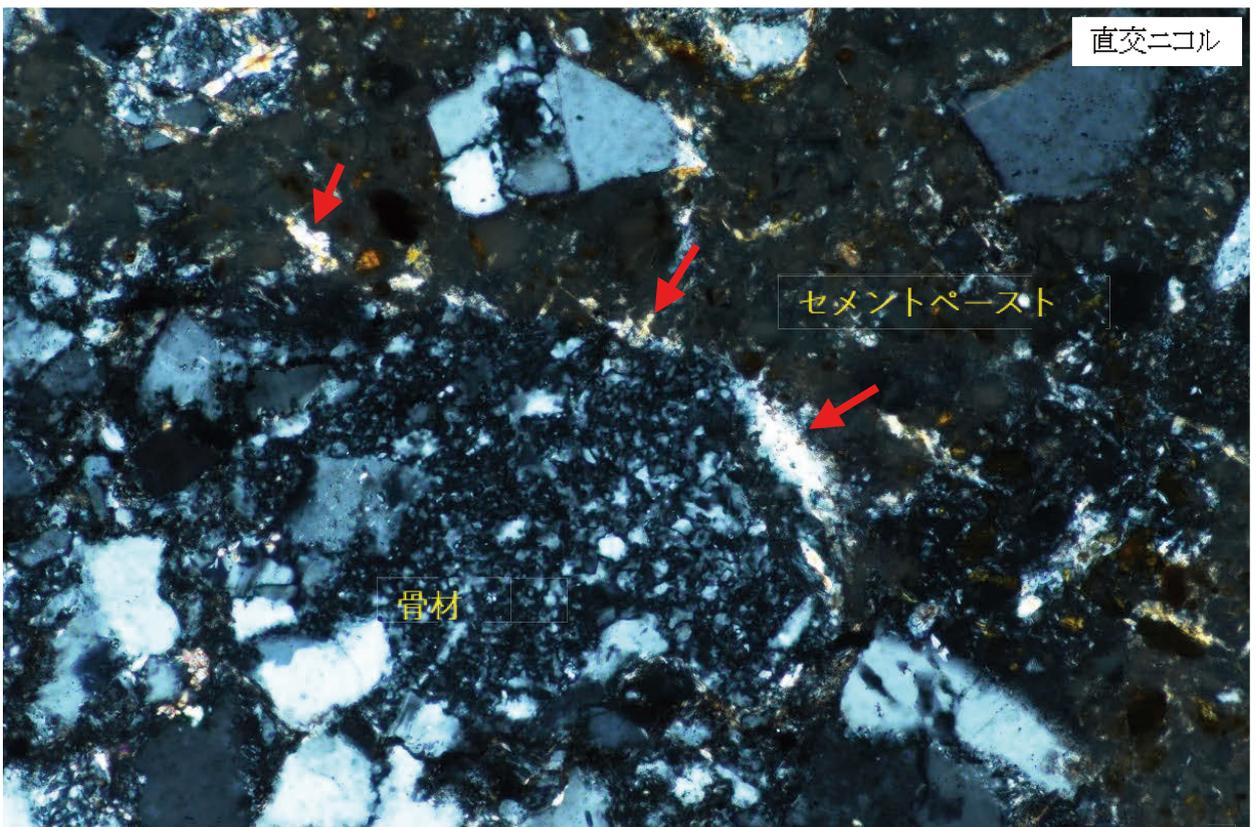
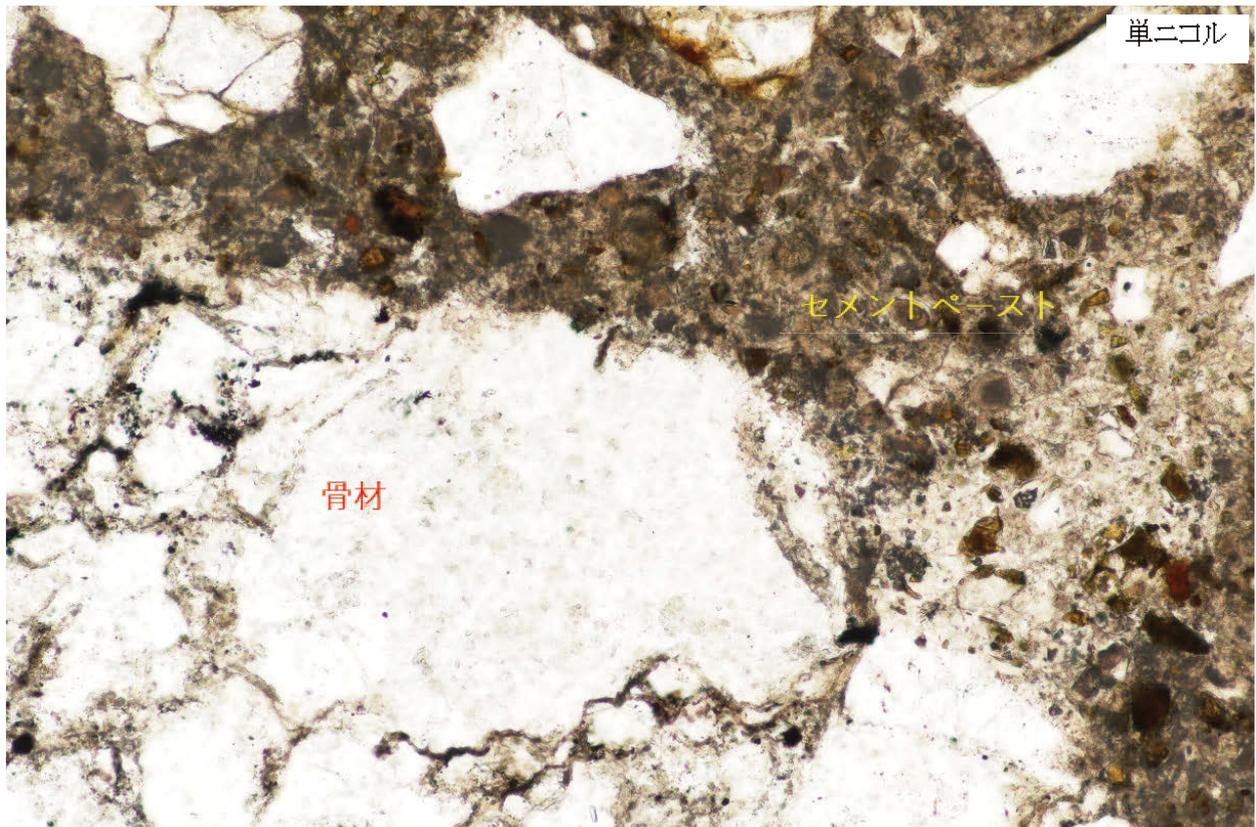
0.1mm

写真-2.2 偏光顕微鏡観察（プレキャスト製品供試体）（養生1年経過）（PL供試体）



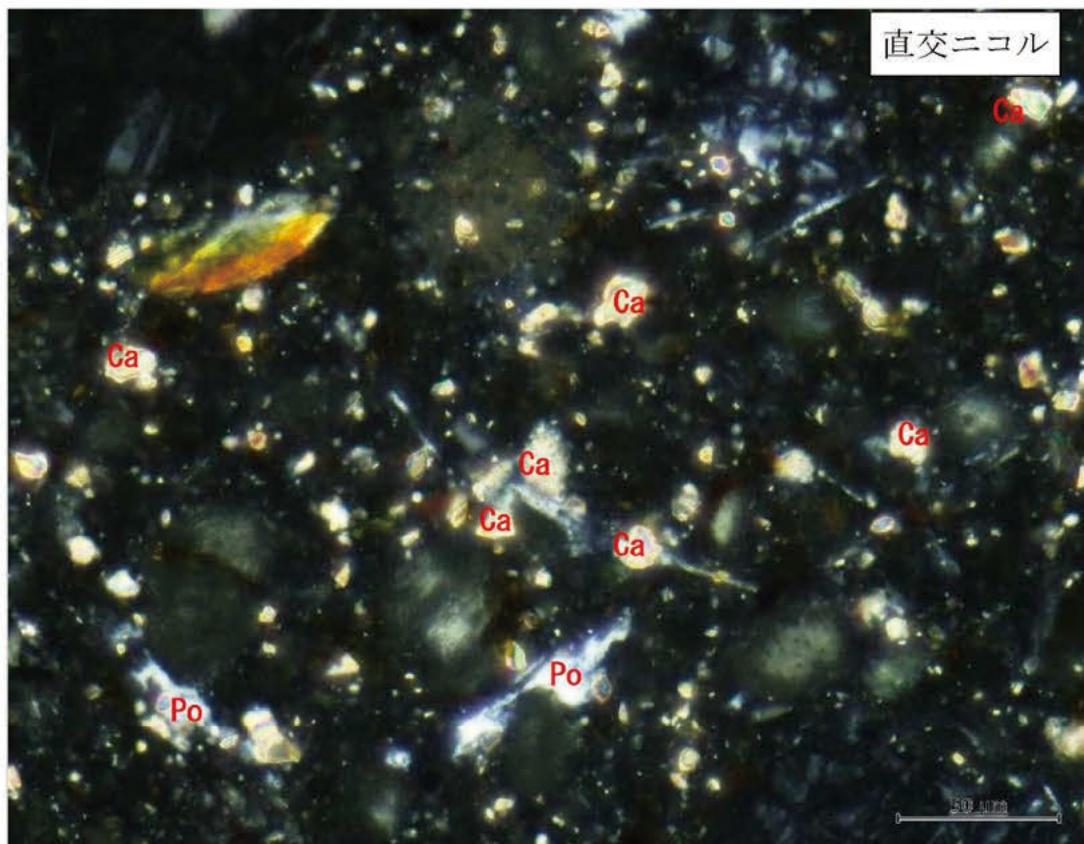
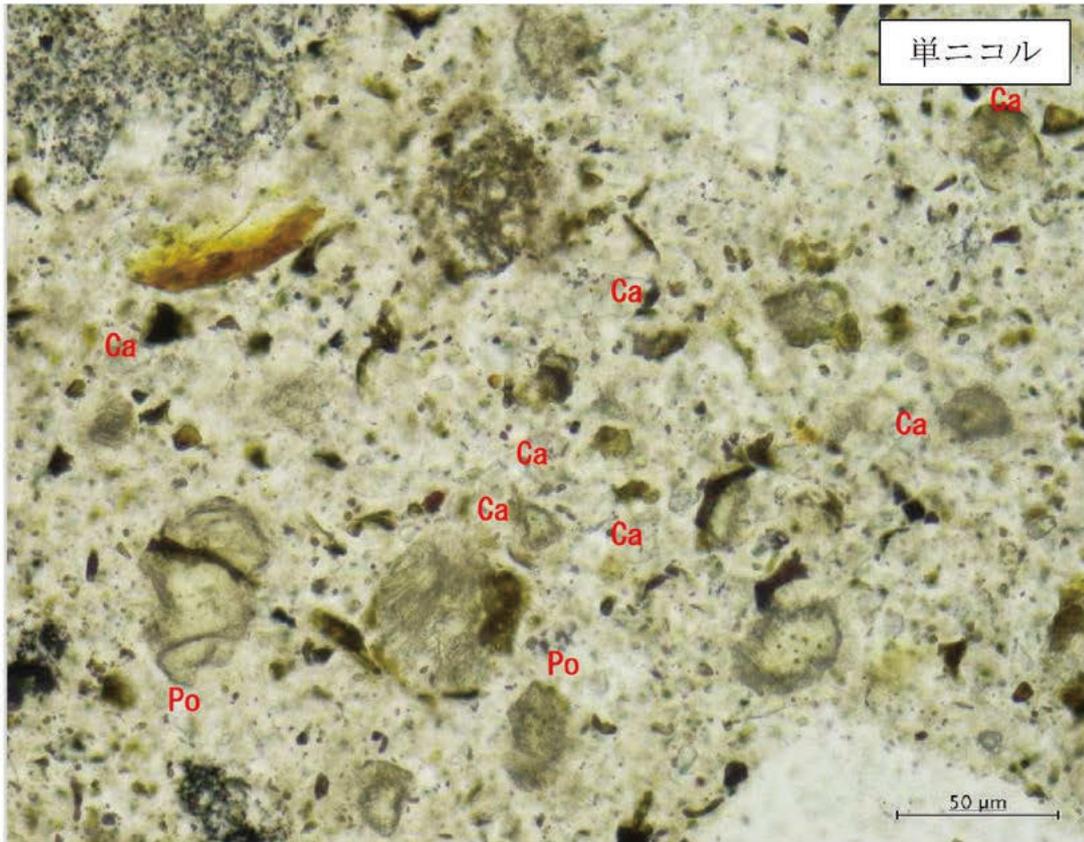
0.1mm

写真-2.3 偏光顕微鏡観察（プレキャスト製品供試体）（養生1年経過）（PEH供試体）



0.1mm

写真-2.4 偏光顕微鏡観察（プレキャスト製品供試体）（養生1年経過）（PEL供試体）



0.1mm

写真-3.1 偏光顕微鏡観察（マスコンクリート供試体）（養生 28 日経過）（M a 供試体）

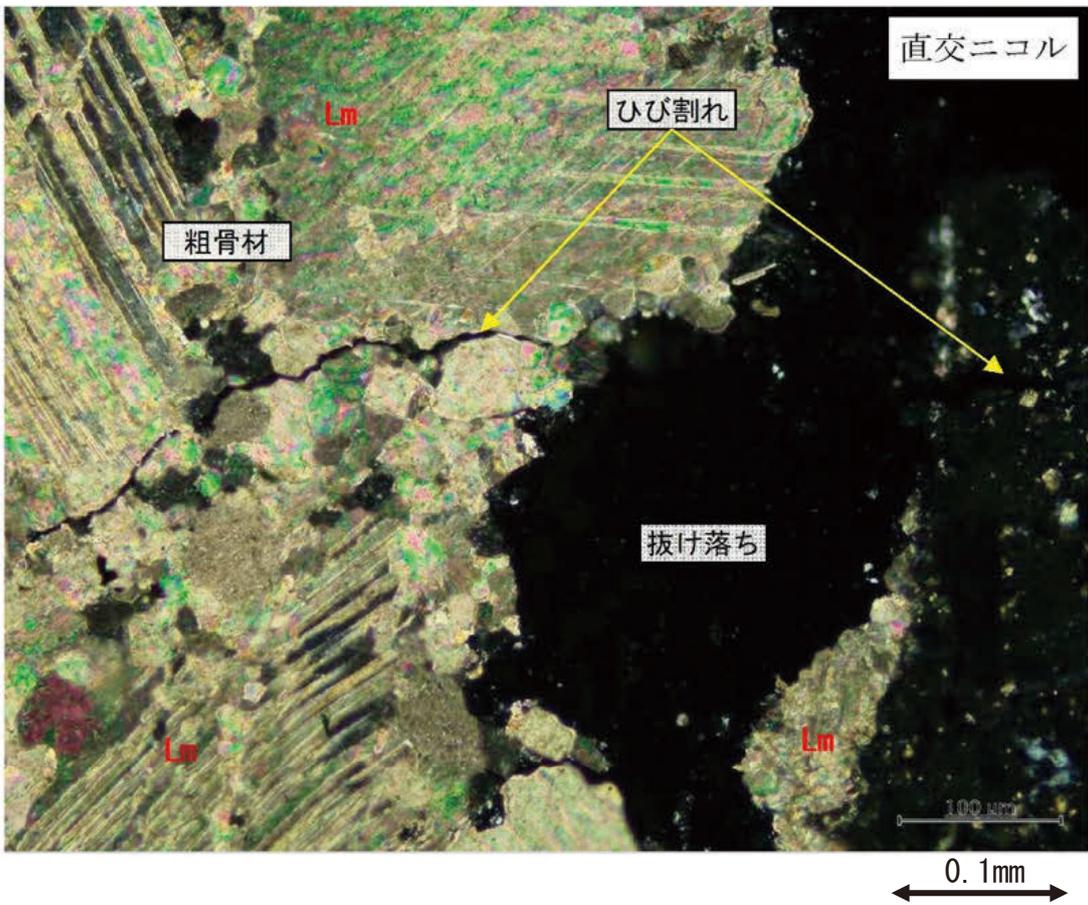
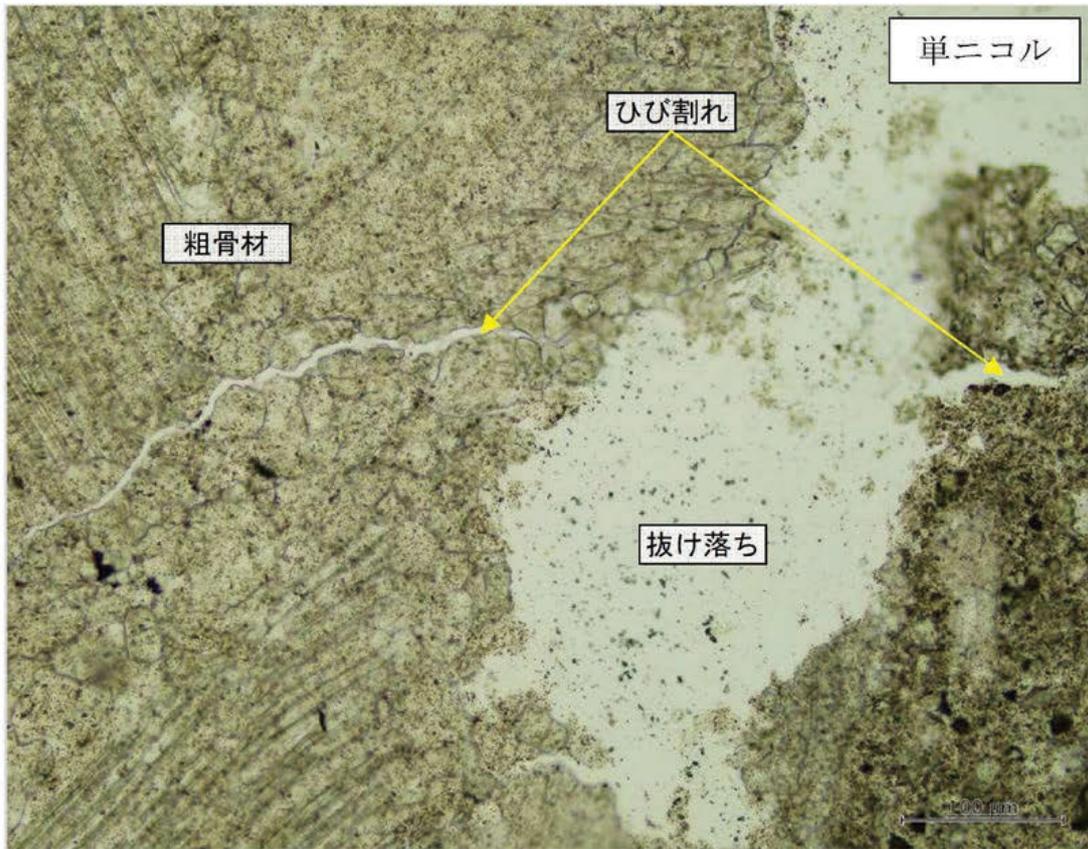
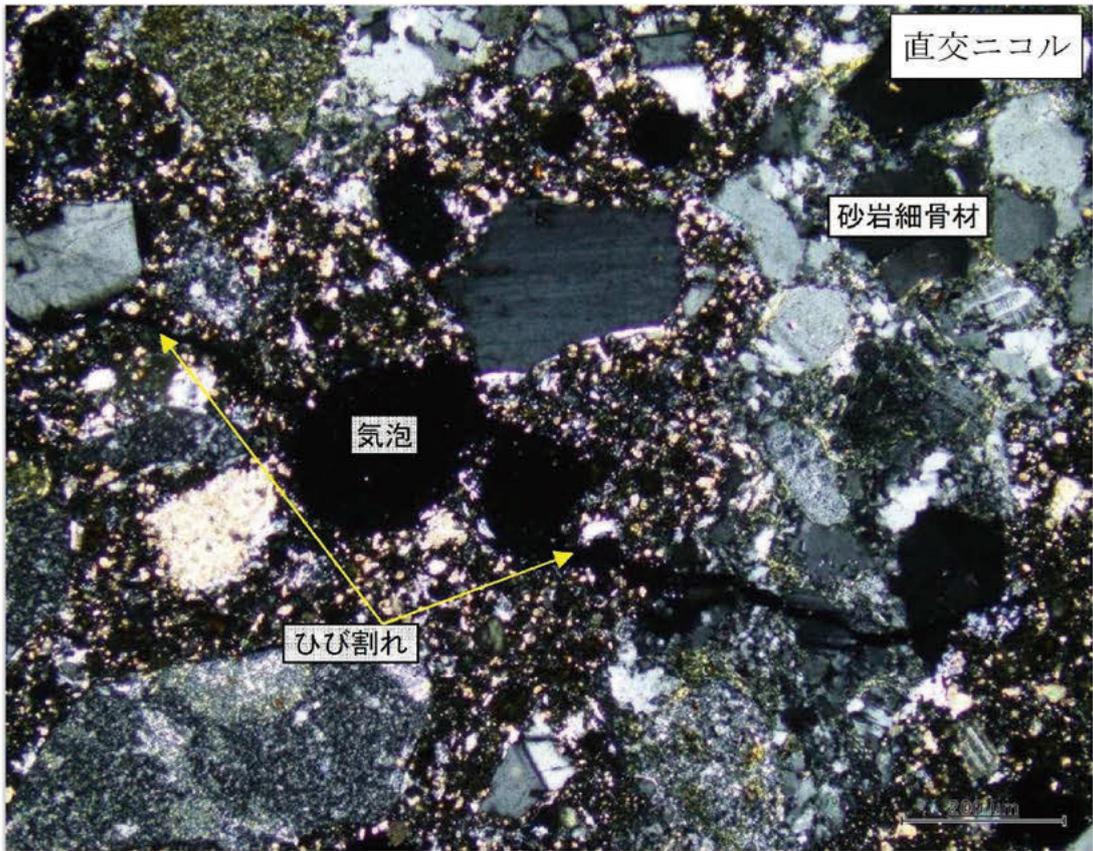
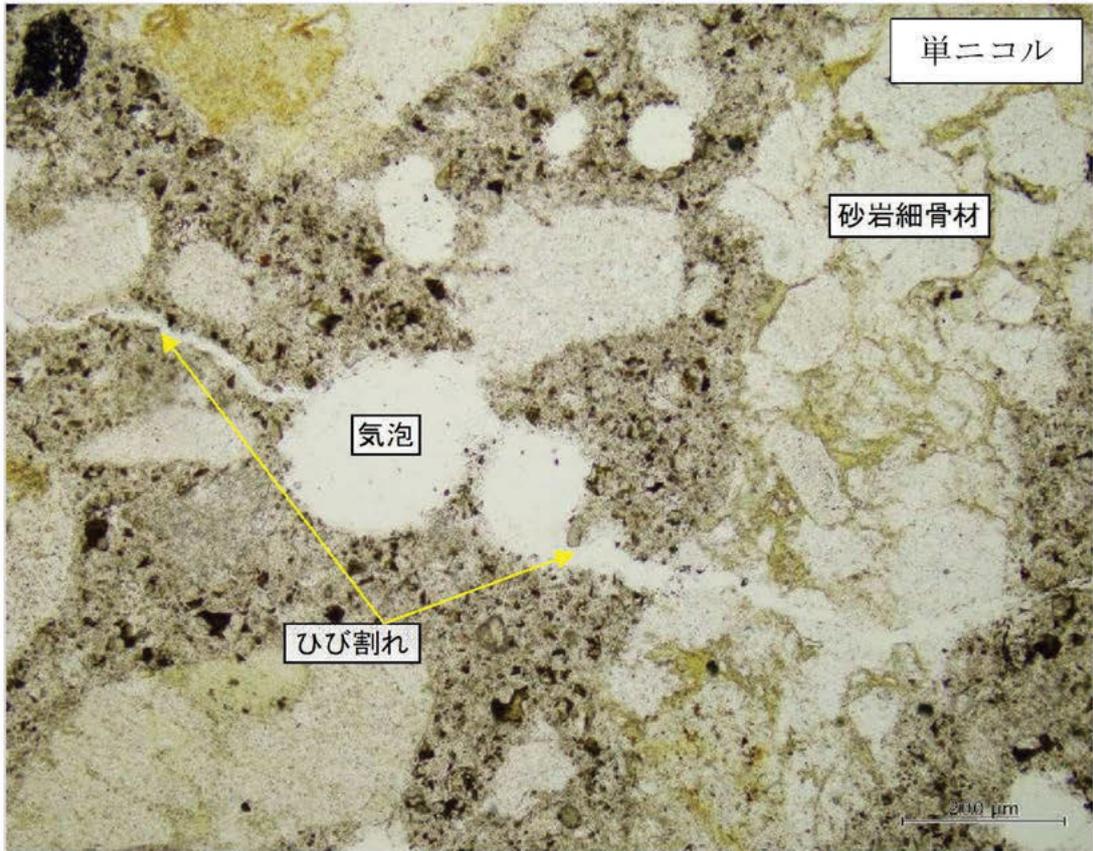


写真-3.2 偏光顕微鏡観察（マスコンクリート供試体）（養生 28 日経過）（M b 供試体）



0.1mm

写真-3.3 偏光顕微鏡観察（マスコンクリート供試体）（養生 28 日経過）（N 供試体）

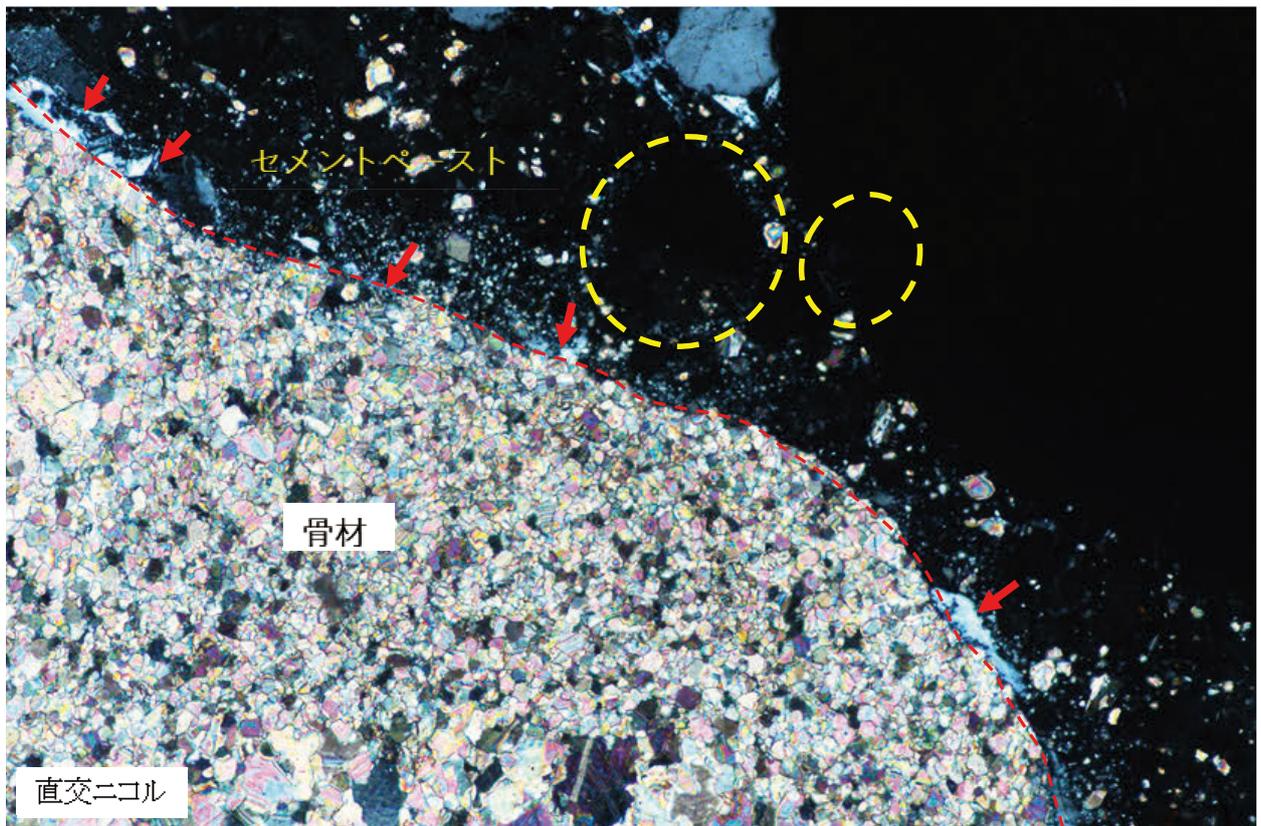
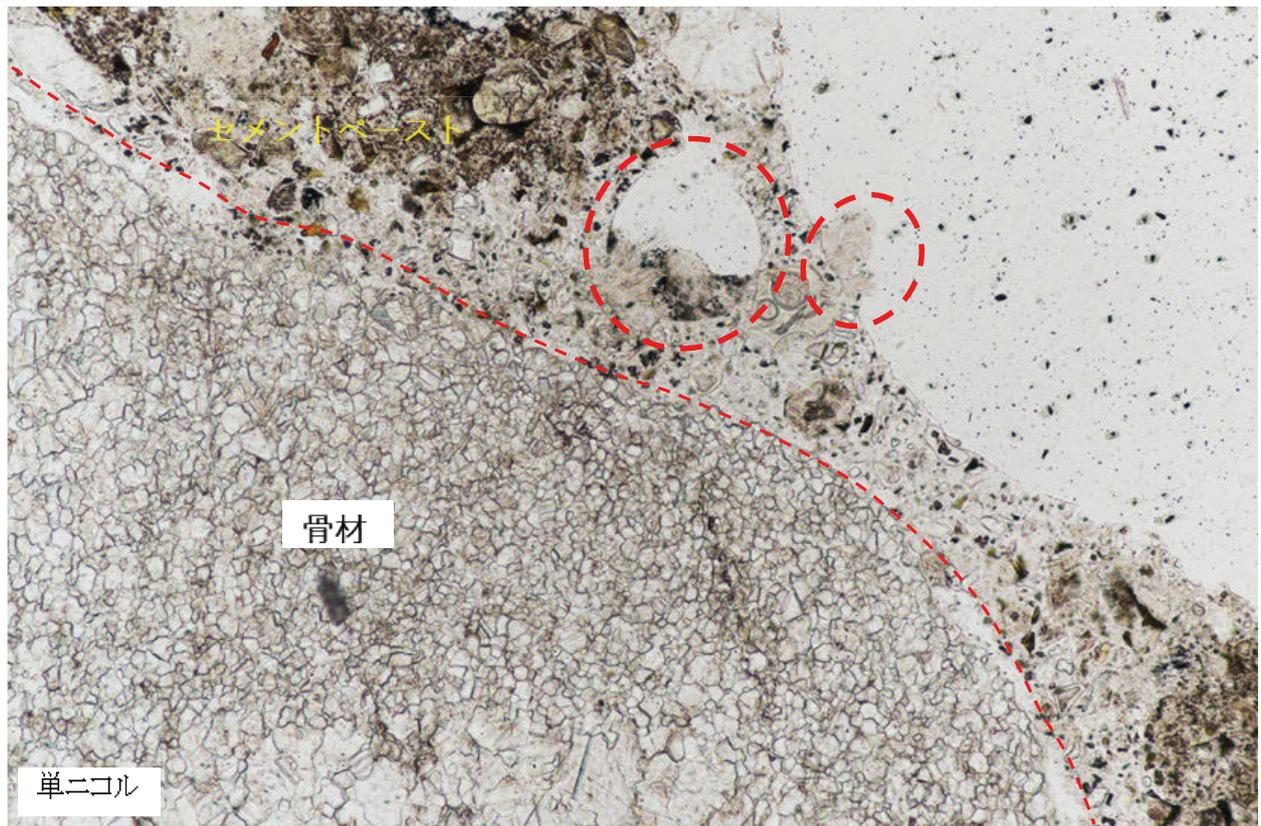
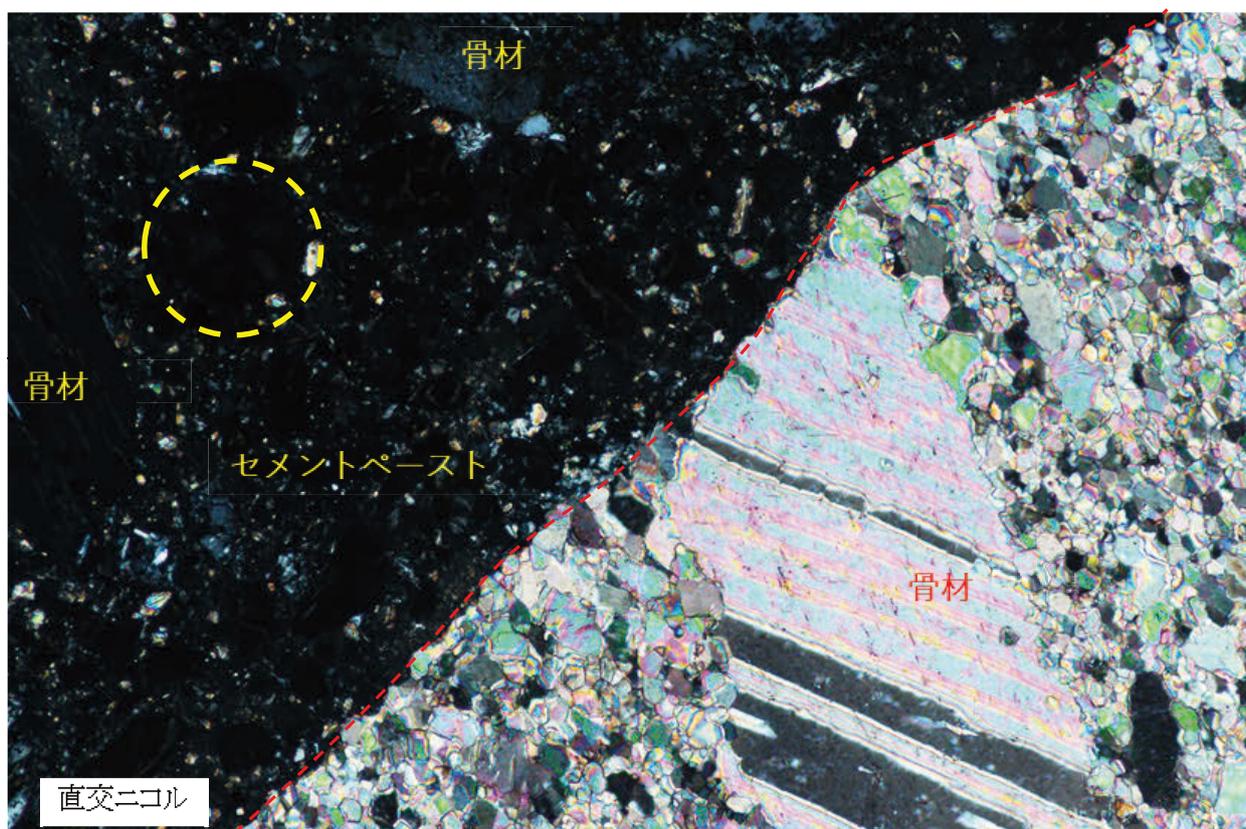
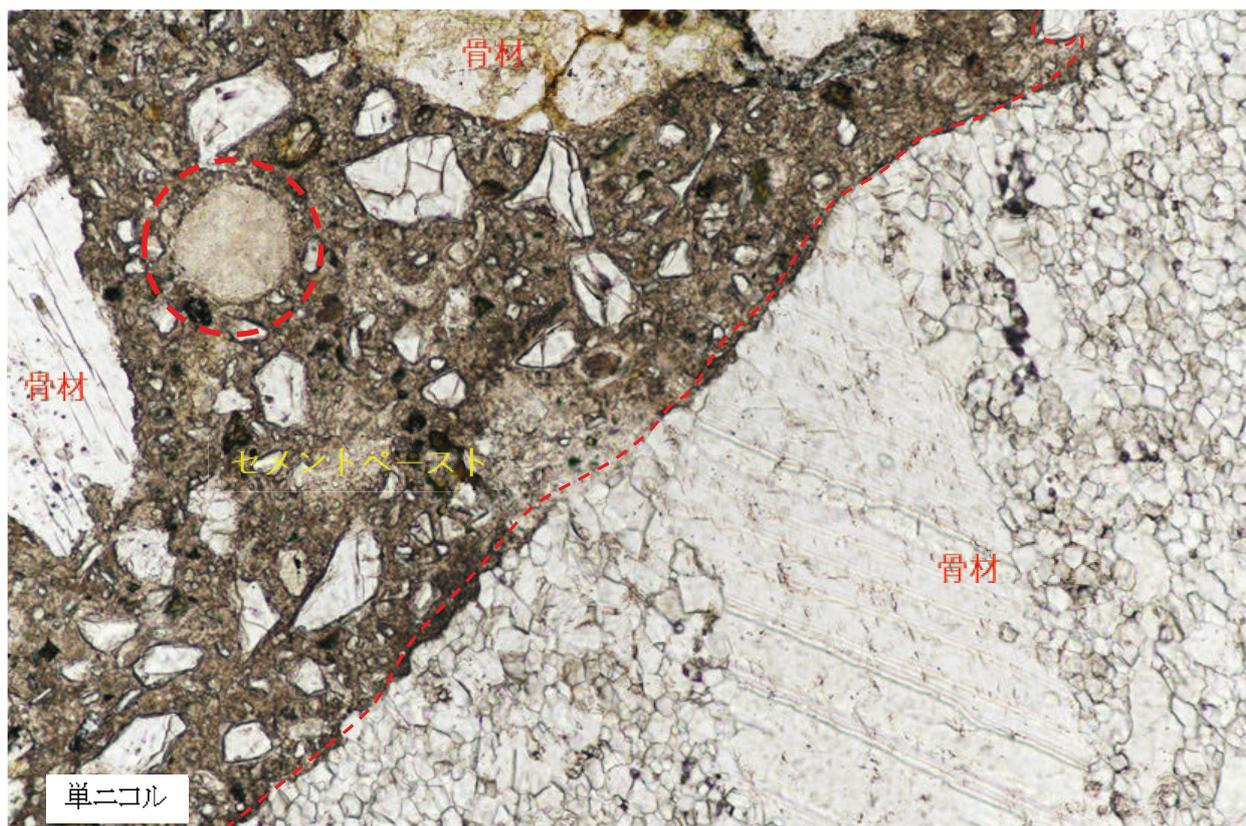
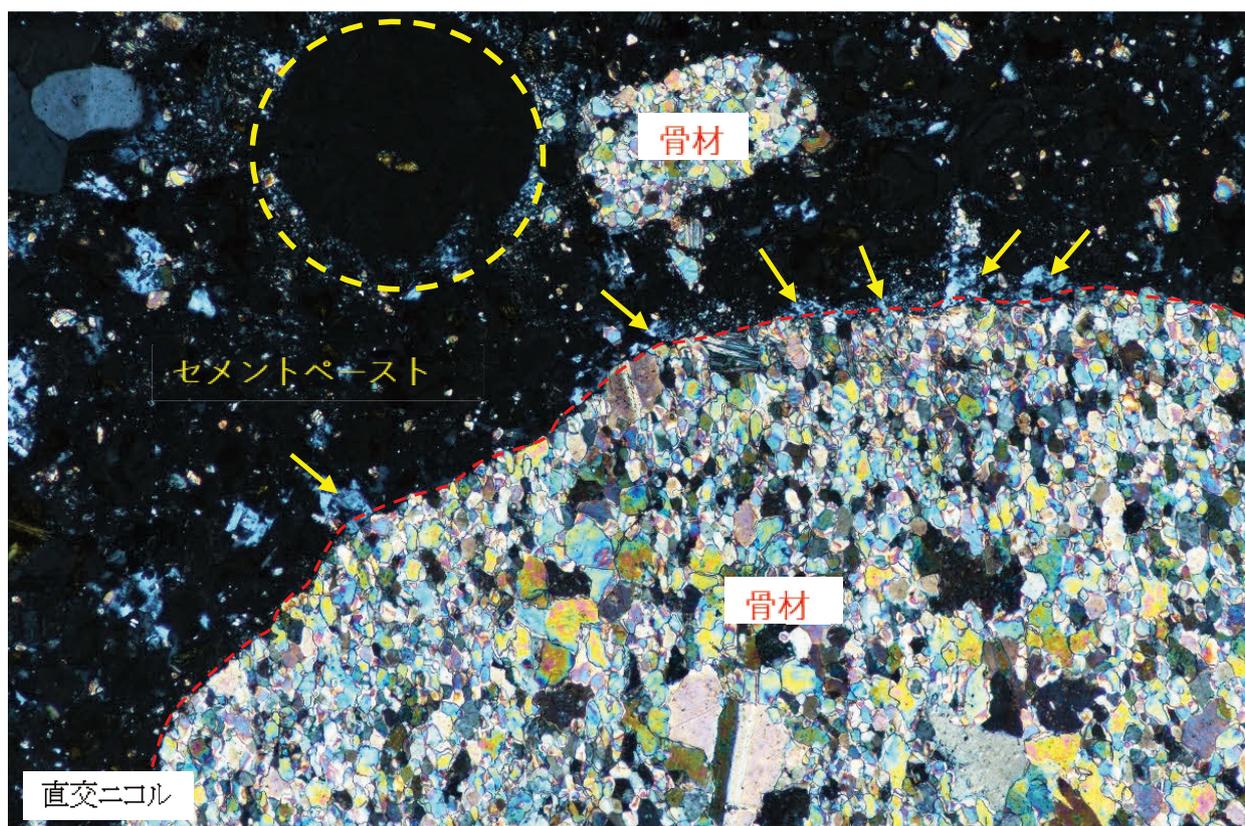
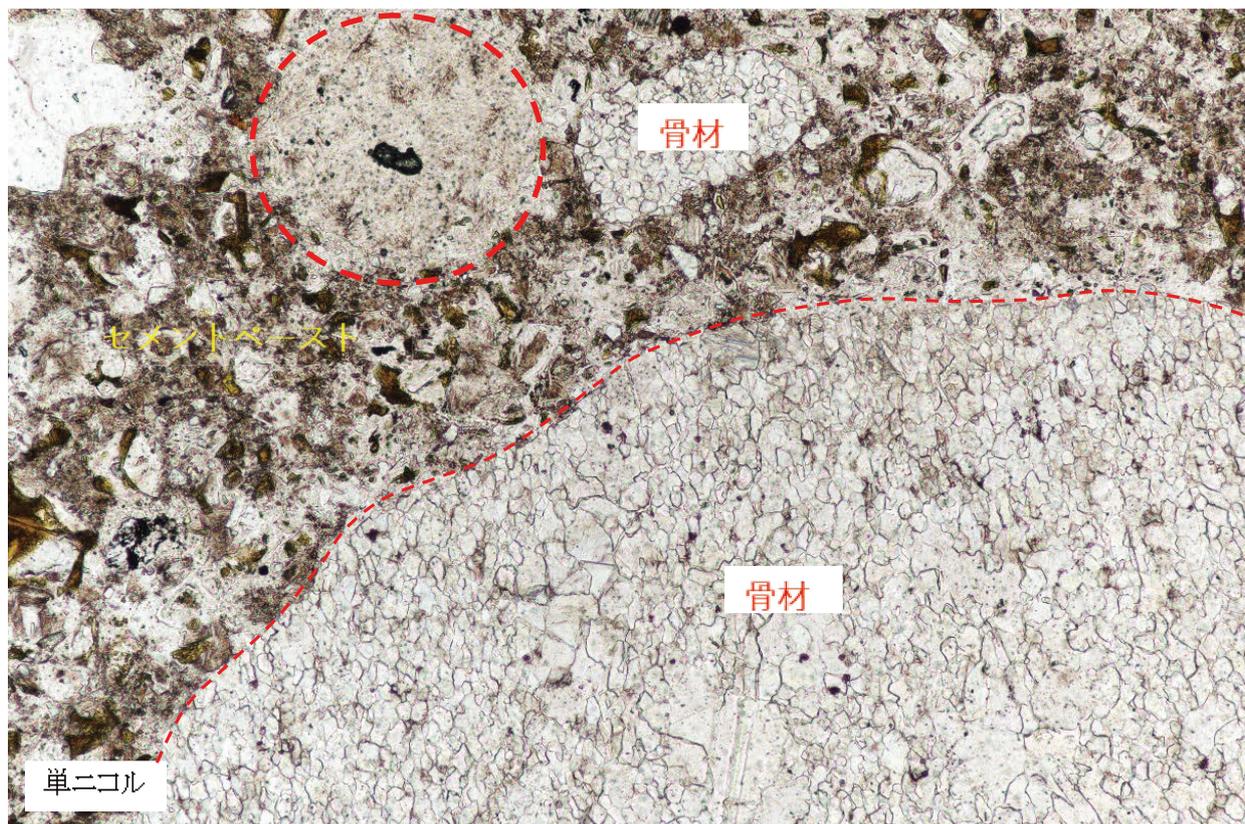


写真-4.1 偏光顕微鏡観察（マスコンクリート供試体）（養生1年経過）【M a 供試体】



0.1mm

写真-4.2 偏光顕微鏡観察（マスコンクリート供試体）（養生1年経過）【Mb供試体】



0.1mm

写真-4.3 偏光顕微鏡観察（マスコンクリート供試体）（養生1年経過）【N供試体】

#### 4. まとめ

今回の調査範囲において、すべての供試体で DEF 現象及び DEF ひび割れは確認されなかった。

今後、30年間の長期的にわたり DEF 現象の生起

を確認するとともに、既存の河川構造物の DEF 現象に対する現場管理手法について、業界団体の動向を注視し、情報を整理する予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) (公益社団) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2016
- 2) 東京都土木技術支援・人材育成センター：再生粗骨材 M を使用したコンクリート二次製品の品質評価（要素試験）委託報告書（平成30年3月）
- 3) 羽原ら (2006)：コンクリートの DEF による硫酸塩膨張の生起条件の検討、コンクリート工学会年次論文集 Vol. 28 No. 1
- 4) (一財) 土木研究センター コンクリートの耐久性向上技術の開発（土木構造物に関する研究成果）平成元年5月