

論文 分級フライアッシュによるプレストレストコンクリートの ASR 抑制効果

板坂 匠*1・Irfan Prasetia*2・冨田 茂生*3・鳥居 和之*4

要旨：北陸地方では、フライアッシュの原料炭の選別と分級機の設置により、高品質の分級フライアッシュを安定的に供給できる体制が整ってきた。本研究では、分級フライアッシュの活用によるプレストレストコンクリート(PC)に使用する高強度コンクリートの ASR 抑制効果を確認する目的で、安山岩の砕砂および砕石を使用したコンクリートの ASR の膨張挙動に及ぼす水結合材比とフライアッシュ置換率の影響について検討した。その結果、分級フライアッシュを 20% 添加した PC は ASR を効果的に抑制できることが確認できた。

キーワード：ASR, 分級フライアッシュ, PC 桁, 促進養生試験, 偏光顕微鏡観察

1. はじめに

近年、北陸や九州・沖縄、東北の地方などで、工場製作の PC 桁や PC 枕木などに ASR によるひび割れが発生しているのが発見されている。北陸地方の PC 桁の事例では、写真-1 や写真-2 に示すように、PC 桁の下フランジの橋軸方向に卓越したひび割れが発生するのが特徴であり、PC 桁の形式によりホロー桁のものは I 桁や T 桁のものよりも ASR による劣化がより大きいことが明らかになっている^{1) 2)}。一方、北陸地方では、七尾大田火力発電所での分級装置の稼働により、高品質なフライアッシュ (JIS A6201 規格の I 種灰相当品) を地域に安定的かつ経済的に供給できる体制が整ってきている^{3) 4)}。従来、コンクリートの ASR 抑制対策としては、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを添加する方法がもっとも有効とされている⁵⁾。しかし、フライアッシュによる ASR

抑制対策は、コンクリートの設計基準強度が 30N/mm² クラスへの適用にとどまっており、プレテンション部材に使用されるような設計基準強度が 50N/mm² クラスのものに対する適用性、とくにその ASR 抑制効果に関しては基礎的な試験データが不足しているのが実状である⁶⁾。

そこで本研究では、分級フライアッシュの添加による PC の ASR 抑制効果を確認する目的で、安山岩の砕砂および砕石を使用したコンクリートの膨張挙動に及ぼすセメントの種類と水結合材比、フライアッシュ置換率の影響について実験的に検討したものである。さらに、促進膨張試験の終了後にコンクリート断片のゲルフルオレスセンス法や偏光顕微鏡による薄片観察を実施することにより、PC に発生する ASR の特徴と分級フライアッシュによる ASR の抑制機構について 2, 3 の考察をしている。



写真-1 プレテンション式 PC ホロースラブ桁の事例
(富山県庄川産の川砂利を使用)



写真-2 ポストテンション式 PCT 桁の事例
(石川県能登半島産の安山岩砕石を使用)

*1JFE エンジニアリング(株) (正会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科 環境科学専攻 (学生会員)

*3 福井県庁

*4 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 工博 教授 (正会員)

表-1 使用骨材のアルカリシリカ反応性

	JIS A 1145 (化学法)		JIS A1146 (モルタルバー法)
北海道産安山岩	Sc : 688mmol/L	Rc : 78 mmol/L	膨張率 : 0.312% (6ヶ月膨張率)
	無害でない		無害でない

表-2 分級フライアッシュの化学成分および物理的性質

	SiO ₂ (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	活性度指数 (%)	
							材齢 28 日	材齢 91 日
分級灰	60.7	0.1	1.9	2.37	4640	106	92	101

表-3 分級フライアッシュの鉱物組成

	結晶質成分 (%)				ガラス質 成分 (%)	合計 (%)
	石英	ムライト	マグネタイト	ライム		
分級灰	5.0	20.6	1.0	0.2	73.2	100

表-4 コンクリートの配合

配合名	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水	セメント*1	フライアッシュ	砕砂	砕石	
RC 配合	OPC	10±2	2±1	50	46.4	160	320	0	875	1013
	FA-10%	10±2	2±1	50	46.4	160	288	32	870	1007
	FA-20%	10±2	2±1	50	46.4	160	256	64	865	1005
PC 配合	HOPC	10±2	2±1	38	44	150	395	0	812	1036
	FA-10%	10±2	2±1	38	44	150	355	39	807	1034
	FA-20%	10±2	2±1	38	44	150	316	79	802	1026

*1RC 配合, PC 配合には普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントをそれぞれ使用

*2 化学混和剤はポリエーテル系高性能減水剤を使用

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

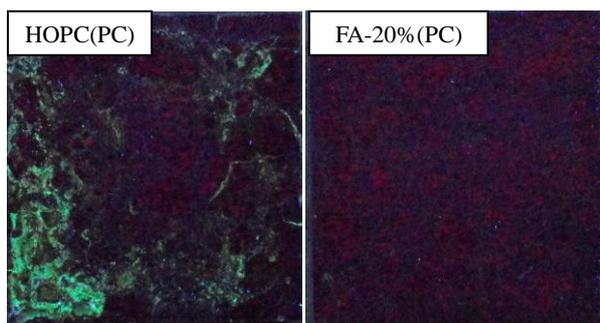
セメントは、普通ポルトランドセメント（略号：OPC，密度：3.16g/cm³，比表面積：3350cm²/g，アルカリ量：0.52%）および早強ポルトランドセメント（略号：HOPC，密度：3.14g/cm³，比表面積：4470cm²/g，アルカリ量：0.50%）を使用した。使用骨材は、高いアルカリシリカ反応性が確認されている北海道札幌近郊の安山岩の砕砂および砕石を用い、化学法(JIS A 1245)およびモルタルバー法(JIS A 1146)の結果を表-1 に示す。安山岩の主要な反応性鉱物はクリストバライトであり、火山ガラスがほとんど含まれていないのが岩石・鉱物学的な特徴である。一方、フライアッシュは、七尾大田火力発電所産の分級灰 (JIS A 6201 規格の I 種灰相当品，平均粒径：7μm) であり，その化学成分および物理的性質を表-2 に，その鉱物組成を表-3 にそれぞれ示す。分級フライアッシュの内割置換率（質量比）は 10%および 20%の 2 種類（FA-10%および FA-20%と表記）とした。コンクリートは，PC 桁の ASR 対策を検討した既往の研究結果⁷⁾を参考として，RC 配

合（水結合材比：50%，普通ポルトランドセメント使用）と PC 配合（水結合材比：38%，早強ポルトランドセメント使用）の 2 種類であり，RC および PC の配合を表-4 に示す。コンクリート試験体は 75mm×75mm×400mm の角柱体であり，試験体作製から翌日の脱型までの初期養生方法として，RC 配合では標準養生（20℃，水中浸漬）を，PC 配合では蒸気養生（前養生 3 時間，2 時間で 50℃まで温度を上昇させ，50℃を 4 時間保持，その後 5 時間で冷却）を実施した。脱型後は 1 週間の密封養生（濡れウェスで包み，その上からビニールで密封）を実施した。

2.2 試験項目

(1) コンクリートの促進養生膨張試験

コンクリート試験体は，脱型後に 1 週間の密封養生を実施した。その後，促進養生条件として，温度 40℃，相対湿度 100%の恒温恒湿槽に保存した促進条件（JIS 法）と温度 50℃の飽和 NaCl 溶液へ浸漬した促進条件（デンマーク法）を採用した。なお，デンマーク法はセメントのアルカリのみであるのに対して，JIS 法は ASR を促進



*試験体サイズ 75mm×75mm

写真-3 ゲルフルオレッセンス法によるデンマーク法終了後の ASR ゲルの発生状況の観察例

させるためにアルカリ総量が 10kg/m^3 となるように塩化ナトリウム(NaCl)を添加した。コンクリートの測定項目は長さ変化と動弾性係数であり、試験開始の材齢(1週間)を基長とし、促進養生期間6ヶ月まで計測を継続した。

(2) 塩化物イオンの浸透状況と ASR ゲルの生成量の測定

デンマーク法による促進養生試験の終了後、コンクリート切断面の塩化物イオンの浸透深さを 0.1N の硝酸銀溶液の噴霧法により調べた。また、JIS 法とデンマーク法における RC 配合および PC 配合コンクリートの ASR ゲルの生成状況を比較するために、新たに開発したゲルフルオレッセンス法(低濃度の硝酸ウラニウム標準液(市販品)を使用し、UV 灯照射による緑色の発色面積を測定するもの)により、試験体の切断面の ASR ゲルの生成量およびその分布状況を観察した。(写真-3 参照)

(3) コンクリートの研磨薄片の偏光顕微鏡による観察

促進養生試験終了後の試験体の中心部分から薄片研磨試料(25mm×25mm, 厚さ 20 μm)を作製し、偏光顕微鏡にて骨材周辺やセメントペースト相のひび割れの発生および ASR ゲルの生成状況を観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 促進養生膨張試験におけるコンクリートの長さ変化

促進養生膨張試験(JIS 法およびデンマーク法)におけるコンクリートの膨張挙動を図-1 および図-2 に示す。コンクリートの ASR による膨張挙動はアルカリの供給形態(内在形か、外来形か)とコンクリートの水結合材比(緻密性の相違)によるアルカリの移動の容易さが大きく影響することが知られている。すなわち、恒温恒湿の養生条件下(JIS 法)では、ASR を発生させるのに十分なアルカリがすでに内在されているので、PC 配合(HOPC, 水結合材比: 38%)は RC 配合(OPC, 水結合材比: 50%)よりも早期に膨張が始まるのが特徴である。

このため、RC 配合と PC 配合の相違はセメントの種類よりも水結合材比による単位セメント量の多少による相違が影響していると考えられる。しかし、養生期間6ヶ月での最終的な膨張率は PC 配合と RC 配合とではほぼ同じになり、両者ともに 0.25%程度の値に収束した。それに対して、飽和 NaCl 溶液浸漬養生下(デンマーク法)では、セメント自身のアルカリ量では ASR を発生させるのに不十分であり、外部からの一定のアルカリが浸透した段階で ASR が発生するので、JIS 法の場合と比べると、PC 配合と RC 配合の膨張率が逆の結果になった。すなわち、デンマーク法では、NaCl がより浸透する RC 配合(OPC, 水結合材比: 50%)は、NaCl の浸透が抑制される PC 配合(HOPC, 水結合材比: 38%)よりも早期に膨張が始まり、養生期間6ヶ月での最終的な膨張率も RC 配合が 0.4%, PC 配合が 0.25%となり、RC 配合がより大きくなった。また、分級フライアッシュの添加によるコンクリートの ASR 膨張の抑制効果は、両促進養生条件下(JIS 法およびデンマーク法)ともに顕著であった。すなわち、JIS 法では PC 配合および RC 配合の FA-10%のみに膨張が発生したが、FA-20%のものは JIS 法およびデンマーク法ともに長期の養生期間にわたり完全に膨張が抑制されていた。

コンクリートの ASR による膨張挙動では、膨張率が 0.04%から 0.05%で目視できる微細なひび割れが発生し、それ以後にコンクリートの膨張率が增大するとともにコンクリートのひび割れが試験体の表面全体に進展していくのが特徴である。このようなひび割れの発生・進展の過程はコンクリートの水結合材比や FA 添加の有無による相違が観察されなかった。本研究では、安山岩の砕砂を用いているので、コンクリート表面に最大 5mm 程度のポップアウトが発生したのが特徴であった。とくに、ポップアウトの発生はデンマーク法(飽和 NaCl 溶液への浸漬養生)にて顕著であり、写真-4 に示すように、それはコンクリートの水結合材比や FA 添加の有無に関係なく発生した。これは、コンクリートの表面部に蓄積された塩化ナトリウムにより砕砂の ASR が局部的に発生したことによるものである。近年、同様なポップアウト現象は、反応性の高い細骨材(富山県常願寺川産)を使用したコンクリート(OPC および BB)でも確認されている。

3.2 促進養生膨張試験におけるコンクリートの動弾性係数の変化

促進養生膨張試験におけるコンクリートの動弾性係数の変化を図-3 および図-4 に示す。コンクリートの膨張率と動弾性係数の関係を示した図-5 から明らかなように、RC 配合および PC 配合ともにコンクリートの膨張率

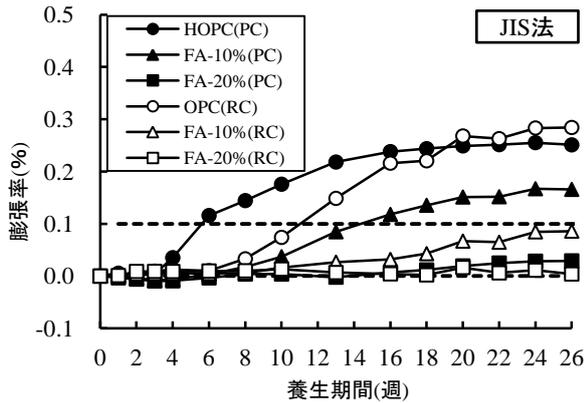


図-1 コンクリートの膨張挙動 (JIS 法)

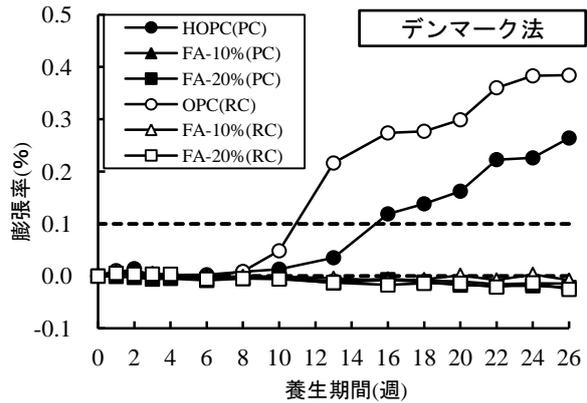


図-2 コンクリートの膨張挙動 (デンマーク法)

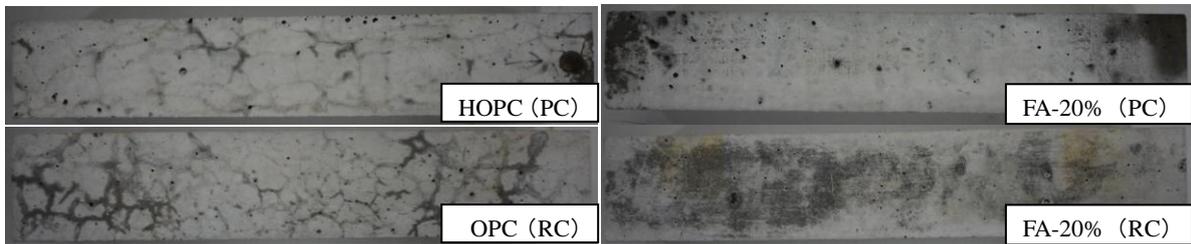


写真-4 デンマーク法による試験終了後の試験体表面の外観

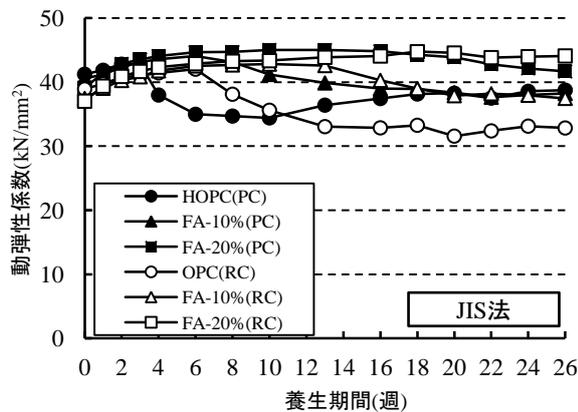


図-3 コンクリートの動弾性係数の変化 (JIS 法)

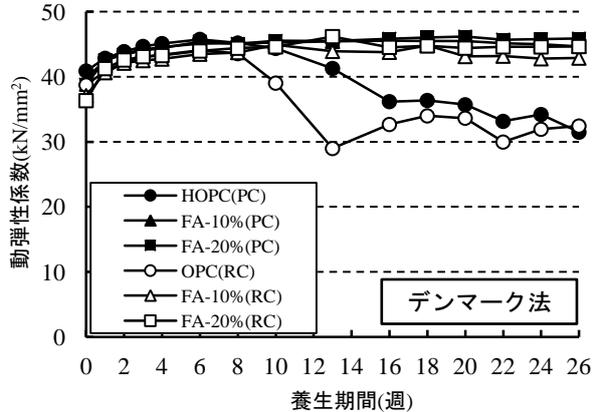


図-4 コンクリートの動弾性係数の変化 (デンマーク法)

と動弾性係数との間には良好な相関性があった。すなわち、RC 配合および PC 配合コンクリートの動弾性係数は試験体表面に微細なひび割れが観察できる段階以前から低下し、その膨張率が 0.1% を越えると動弾性係数の低下率が顕著になった。このように、コンクリートの動弾性係数は ASR 膨張による劣化過程 (ひび割れの発生と進展) を明確に反映しており、コンクリートの膨張率と動弾性係数の両者を指標にすることにより、コンクリートの ASR 劣化度の測定精度を向上することが期待できた。また、JIS 法の一部の試験体では、促進養生期間中に動弾性係数の一時的な回復や減少が確認された。この現象は、ASR により発生した骨材周囲のひび割れに対して、まず流動性の高い ASR ゲル ((Na+K) リッチ) が進展かつ充

填し、その後、ひび割れ内の ASR ゲルが水酸化カルシウムとの接触により化学組成 ((Na+K) への Ca の置換) の変化をとめないながら、ひび割れを完全に充填することにより発生しているものと推察される。

3.3 試験終了後におけるコンクリートの塩分浸透深さと ASR ゲルの生成状況

促進養生膨張試験終了後 (養生期間 6 ヶ月) のコンクリートの塩分浸透深さと ASR ゲルの生成量 (試験体切断面の発色面積率) を表-5 および表-6 に示す。コンクリートの塩分浸透深さに関して、JIS 法 (内在形) では、RC 配合および PC 配合ともに切断面の全体が白色に発色し、とくに OPC や HOPC 単味のものは ASR ゲルの生成 (緑

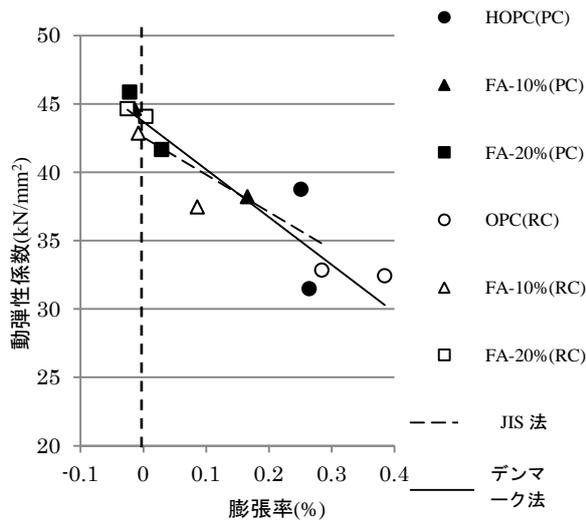


図-5 コンクリートの動弾性係数と膨張率の関係

表-5 デンマーク法終了後の塩分浸透深さ

配合名		平均浸透深さ (mm)
PC 配合	HOPC	24
	FA-10%	18
	FA-20%	15
RC 配合	OPC	完全浸透*
	FA-10%	20
	FA-20%	16

*75mm×75mm の断面に完全に浸透

色の発色域)が顕著に観察された。それに対して、FA-20%のものは、ASRゲルの発色域が小さくなり、その輝度も全体的に減少していた。JIS法(内在形)のフライアッシュのASR抑制効果は、フライアッシュのポズラン反応でフライアッシュ粒子の周囲に生成した、C/S比が小さいC-S-Hが細孔溶液からアルカリを吸着し、コンクリートのアルカリ雰囲気は低下することにより発揮されていると推察された⁸⁾。従って、分級フライアッシュの平均粒径が7 μ mと小さいことから、フライアッシュの反応率が大きく増加していた。一方、デンマーク法(外来形)では、塩分の浸透領域とASRゲルの生成状況は良く一致していた。すなわち、FA-20%のものはOPCやHOPC単味のものと比較して緻密な内部組織のために塩分の浸透が試験体表面に限定されており、このためASRゲルの生成自体が塩分浸透域のみであり、中心部でのASRの発生が完全に抑制されていた。これらの結果より判断すると、デンマーク法(外来形)でのフライアッシュのASR抑制効果は、ポズラン活性の高いフライアッシュにより早期に緻密な内部組織が形成されることと、ポズラン反応の

表-6 JIS法およびデンマーク法終了後のASRゲルの発色面積

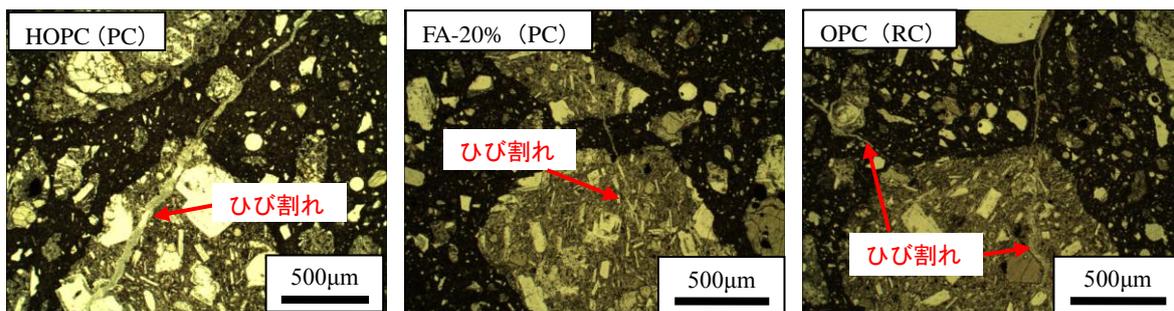
			ASRゲルの発色面積 (%)
JIS法	PC 配合	HOPC	19.5
		FA-10%	18.3
		FA-20%	14.2
	RC 配合	OPC	21.2
		FA-10%	19.4
		FA-20%	13.4
デンマーク法	PC 配合	HOPC	12.3
		FA-10%	0.6
		FA-20%	0.1
	RC 配合	OPC	6.5
		FA-10%	3.1
		FA-20%	0.2

過程で水酸化カルシウムが消費され、フリーデル氏塩の生成(NaClによるASR発生機構の基本的な概念)が抑制されること、の相乗効果によるものと推察できた。

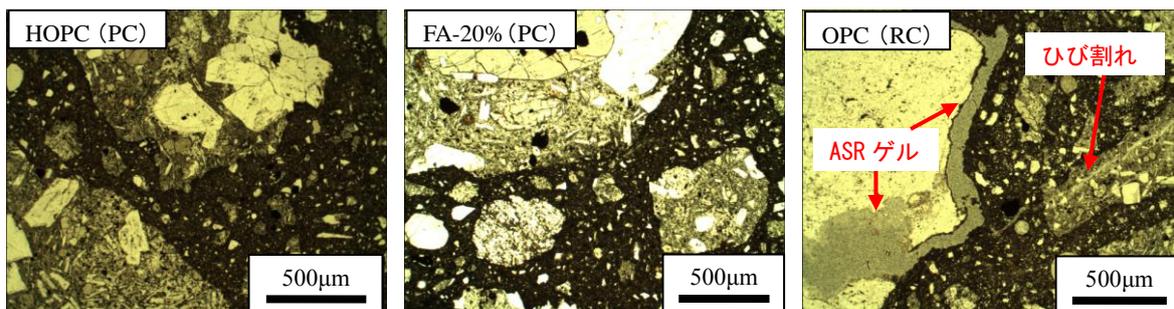
偏光顕微鏡によるコンクリート薄片の観察結果を写真-5に示す。偏光顕微鏡による観察は、コンクリート試験体から2,3枚の薄片を作製して表面部と中心部との比較を実施している。コンクリートの中心部の薄片の観察結果より、JIS法(内在形)では、今回の試験体の骨材は砕砂と砕石の組み合わせであるが、OPCおよびHOPC単味のもの安山岩粒子の中で、とくに5mmから10mm程度の粒径のものが良く反応していた。すなわち、写真-5に示すように、OPCおよびHOPC単味のコンクリートでは、安山岩の粒子界面から発生したひび割れ(ほとんどのものがASRゲルで充填されている)がセメントペーストに向かって進展しており、セメントペーストと骨材に発生した多数のひび割れが膨張力の源になっているのが理解できた。それに対して、FA-20%のものはいずれもASRによるひび割れの本数が少なく、その幅もかなり小さくなっていた。同様な薄片の観察結果はデンマーク法(外来形)でも確認でき、各コンクリートのASRによる膨張挙動の相違は偏光顕微鏡観察によるひび割れの発生および進展という微視的な観察結果からも裏付けられた。

4. 結論

分級フライアッシュの添加によるPCのASR抑制効果を確認する目的で実施した一連の研究結果をまとめると、次のようである。



JIS 法終了後の薄片観察結果



デンマーク法終了後の薄片観察結果

写真-5 促進養生試験終了後の中心部の薄片観察結果

- 1) JIS 法（内在形）とデンマーク法（外来形）により分級フライアッシュによる ASR の抑制機構は相違するが、両促進養生条件において分級フライアッシュを 20% 添加した PC はセメント単味と比較して ASR を効果的に抑制することができた。
- 2) コンクリートの膨張率と動弾性係数の両者を指標とすることにより、コンクリートの ASR 劣化度の測定精度を向上することができた。
- 3) 分級フライアッシュは高いポゾラン活性を有しており、JIS 法（内在形）は C-S-H によるアルカリ吸着が、デンマーク法（外来形）は緻密な組織形成による塩分浸透の低減が、ASR 発生の抑制効果に大きく寄与していた。
- 4) コンクリートの膨張率はゲルフルオレセンス法での発色面積や偏光顕微鏡による薄片観察の結果とも良く一致していた。
- 2) 湊俊彦，鳥居和之：コンクリート構造物の鉄筋破断および配筋不良の ASR 劣化に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.989-994，2010
- 3) 鳥居和之：フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化—北陸地方の ASR 問題への取り組みと情報発信—，電力土木，No.357，pp.5-11，2012
- 4) 橋本徹，久保哲司，参納千夏男：産学官連携による北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進に向けた取り組み，電力土木，No.361，pp.56-60，2012
- 5) 川村満紀：コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策 (1)，コンクリート工学，Vol.32，No.4，pp.74-79，1994
- 6) 俵道和，呉承寧，石川嘉崇，滝上邦彦：プレストレストコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.197-202，2011
- 7) 松村将充，蓑田理希，蔡云峰，鳥居和之：高炉スラグ微粉末を含有したプレストレストコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.803-808，2006
- 8) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会報告書（富山・石川版），pp.54-61，2012

謝辞

本研究の実施にあたり、ご協力いただいたピーエス三菱（株）技術研究所並びに北陸電力（株）土木部の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 尾花祥隆，鳥居和之：プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化事例の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1065-1070，2008