

論文 プレストレストコンクリート桁に対するコアによる ASR 劣化度診断

杉浦 尚樹^{*1}・小林 和弘^{*2}・深田 宰史^{*3}・鳥居 和之^{*4}

要旨：本研究では、プレストレストコンクリート（PC）桁のアルカリシリカ反応（ASR）によるひび割れの発生に及ぼすフライアッシュ混入の影響について調べる研究の一環として、PC 桁の各部位から多数のコアを採取し、PC 桁の膨張率とコアの圧縮強度や静弾性係数、超音波伝播速度との関係について検討した。本研究の結果より、PC 桁からのコアの採取位置、すなわち PC 桁の中央部と端部、橋軸（プレストレス）方向とその直角方向の相違による、ASR を生じたコンクリートの膨張・ひび割れ発生の異方性が明らかになり、PC 桁の ASR 劣化度診断におけるコアの圧縮強度や静弾性係数などの評価手法を提案できた。

キーワード：PC・JIS 桁、フライアッシュコンクリート、コア、ASR、診断、偏光顕微鏡観察

1. はじめに

PC 桁の ASR 抑制対策に関しては、高強度コンクリートのため単位セメント量が多くなるので、現在のセメントのアルカリ量（0.6%）でもコンクリートのアルカリ総量を 3kg/m^3 以下に抑えることが難しい場合がある¹⁾。また、プレテンション桁などではプレストレス導入のために初期強度が必要であり、これまで混合セメントの使用は容易でないとされていたが、北陸地方では高品質フライアッシュ（分級フライアッシュ）の供給体制が整ってきたため、工場製作の PC 桁や PC 床版への実用化が始まっている²⁾。その背景の 1 つとしては、現行の骨材の化学法（JIS A 1145）にて「無害」と判定され、かつコンクリートのアルカリ総量が 3kg/m^3 以下の場合でも ASR が実際に発生しているものがあることを指摘できる。さらに、北陸地方の骨材事情に配慮すると、骨材の ASR 判定結果に関係なく、フライアッシュコンクリートを標準化し、地域的な実装を図ることの方が得策であると考えられる。

ASR が発生した PC 桁では、写真-1 に示すように、使用・環境条件（温度、日射、雨かきなど）とコンクリートの配合条件（反応性骨材の種類、アルカリ量など）の影響を受け、PC 鋼材に沿った顕著なひび割れと変形が観察される。このように PC 桁では、PC 鋼材による拘束を反映した形でひび割れが発生するのが特徴であり、また、PC 桁のコアによる調査・診断時にはプレストレス方向とそれに直交する方向で工学的性質が相違することに注意すべきであると指摘されている³⁾。実際の調査点検時には、コアは端部の側面方向からしか採取できないが、このコアの試験値からは PC 桁の耐荷性や剛性を正確に推定できないと考えられる。一方、ASR が発生した PC・

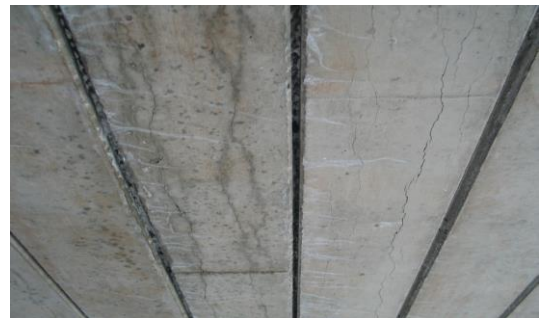


写真-1 ASRが発生したPCホロー桁のひび割れ(底面)

JIS 桁の載荷試験では、フライアッシュを 15%混入した PC 桁は早強セメント単味のものと比較して ASR がごく軽微に抑えられ、PC 桁の耐荷力および剛性ともに全く低下していないことを別途確認している。

そこで本研究では、PC 桁に発生した ASR 劣化に及ぼすフライアッシュ混入の影響を調べる研究の一環として、PC 桁の橋軸（プレストレス）方向とその直角方向の各部位から多数のコアを採取し、コアの圧縮強度や静弾性係数などの工学的諸性質の変化を実験的に検討している。

2. 実験概要

2.1 PC 桁の形状とコンクリートの配合

(1) PC 桁の形状と暴露条件

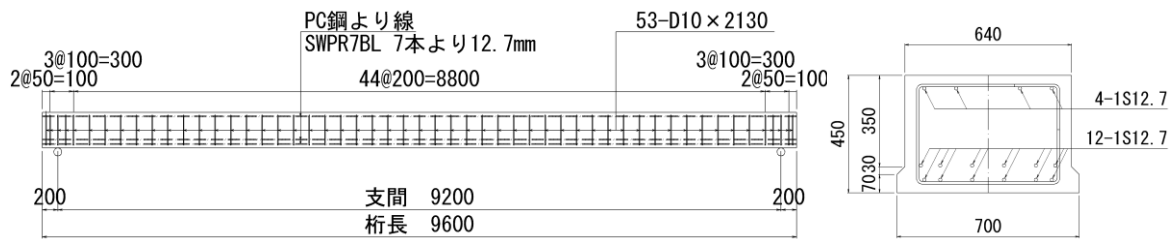
PC・JIS 桁（JIS A 5373-AS09 桁）の形状および寸法を図-1 に示す。JIS 桁は、断面 W640/700mm×H450mm、長さ 9600 mm の梁部材に 1S12.7 の PC 鋼材を上縁側に 4 本、下縁側に 12 本をそれぞれ配置している。配筋はスターラップとして SD295A-D10 を 200mm 間隔で配置している。PC 桁は、打設後に蒸気養生（温度 50℃）を実施し、打設後 14 時間経過後に、プレテンション方式にてプレスト

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻（学生会員）

*2 (株) ピーエス三菱 名古屋支店金沢営業所（正会員）

*3 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 博（工） 准教授（正会員）

*4 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 工博 教授（フェロー会員）



図－1 PC 桁の形状および寸法

表－1 PC 桁に使用したコンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						SP* ¹ (B×%)	AE* ² (B×%)
			W	B		S	G	NaCl		
				C	FA					
H	38.7	46.3	150	388	—	822	955	25.5	1.00	0.006
FA	34.8	44.6	150	366	65	770	955	25.5	1.20	0.02

*1 SP：高性能減水剤（ナフタリンスルホン酸塩），*2 AE：AE 剤（ヴィンソルレジン）

レス（導入直後の PC 鋼材の応力：1271 N/mm²）を導入した。その後，約 1 週間屋内にて湿潤養生を実施した。初期養生終了後，金沢大学の構内の日当たりの良い場所に約 1 年間半，屋外暴露した。PC 桁の屋外暴露試験の外観を写真－2 に示す。

(2) コンクリートの配合と反応性骨材の特徴

使用セメントは早強ポルトランドセメント（密度：3.14g/cm³，比表面積：4510cm²/g，記号 H）であり，フライアッシュ（七尾大田石炭火力発電所産，密度：2.43g/cm³，比表面積：4500cm²/g，強熱減量値：2.0%，記号 FA）は分級されたものを使用した。反応性骨材は，北陸地方で最も反応性が高いとされている，常願寺川産の川砂（表乾密度：2.61g/cm³）および川砂利（表乾密度：2.61g/cm³）（化学法（JIS A 1145）：「無害でない」，モルタルバー法（JIS A 1146）：「無害でない」）をともに使用した。両骨材に約 30%含有されている安山岩の主要な反応性鉱物はクリストバライトおよびオパールであり，川砂および川砂利はほぼ同様な反応性を示すことが知られている⁴⁾。PC 桁に使用したコンクリートの配合を表－1 に示す。コンクリートの設計基準強度は 50N/mm² であり，早強単味（H 試験体）とフライアッシュ 15%混入（FA 試験体）の 2 種類である。骨材の ASR 膨張を早期に発生させる目的で，コンクリートにはアルカリ（NaCl）を等価 Na₂O 量で 13 kg/m³ 添加した。なお，セメントおよびフライアッシュのアルカリ量は考慮していない。

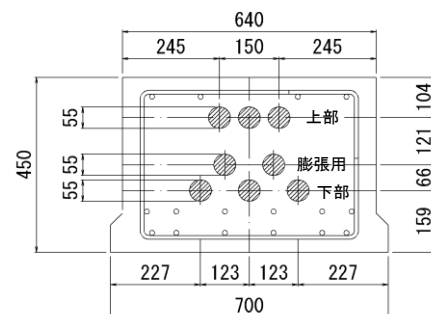
2.2 試験方法

(1) PC 桁の膨張率と ASR 劣化状況の測定

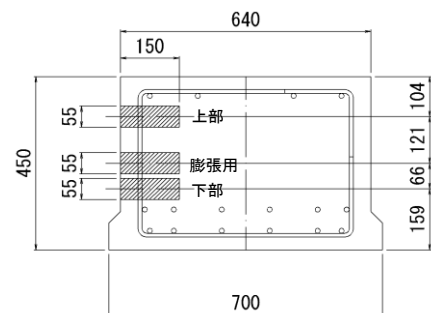
約 1 年間半の暴露を行った PC 桁の ASR 劣化の進行過程を，コンクリートの膨張率，超音波伝播速度およびそり量を計測することで追跡した。なお，コンクリートの膨張率は，PC 桁試験体の端部と支間中央について，上面，



写真－2 PC 桁の暴露状況



(a) 橋軸方向



(b) 軸直角方向

図－2 PC 桁のコア採取位置

側面および下面の橋軸方向および軸直角方向にて計測した。コンクリートの膨張率は，計測位置に貼り付けたゲ

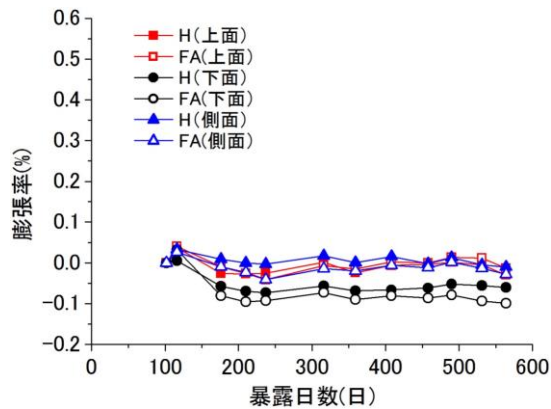


図-3 PC 桁の膨張率の経時変化（橋軸方向）

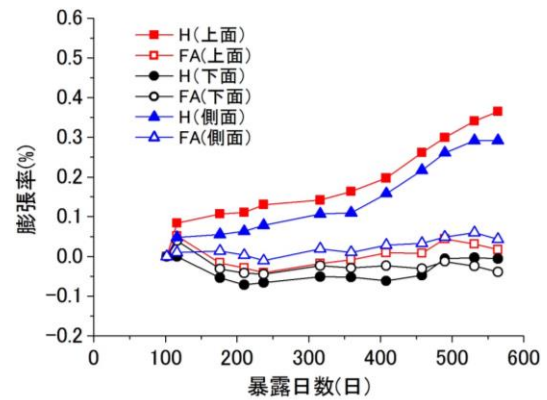


図-4 PC 桁の膨張率の経時変化（軸直角方向）

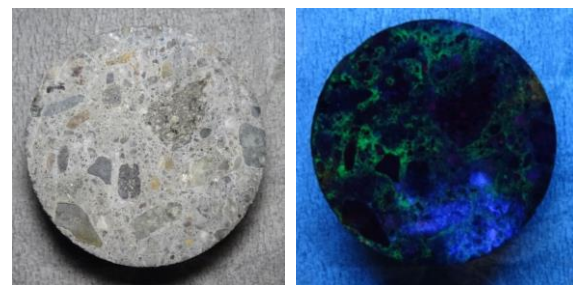
ージチップ間（基長：100mm）の変化より求めた。また、超音波伝播速度の計測は、試験体側面の膨張率の計測位置とほぼ同様の位置にて実施した。また、そり量は桁下面の両端部間にて計測した。

(2) コアによる力学的性質の測定と偏光顕微鏡による ASR 劣化度の判定

PC 桁は載荷試験後にワイヤソーにより、各桁を 3150mm+3300mm+3150mm の 3 等分に切断した。そして、その切断面および側面よりコンクリートコア（直径：55mm，長さ：110mm）を採取した。PC 桁のコア採取の位置を図-2 に示す。コアの力学的性質の測定項目は圧縮強度、静弾性係数および超音波伝播速度である。また、コアの膨張性と ASR 劣化度との関係を 1N・NaOH 溶液浸漬法により検討した。さらに、ゲルフルオレッセンス法⁵⁾で試験体の ASR ゲルの生成状況（UV 灯下での黄緑色域）を観察した。また、コアの薄片研磨試料（厚さ：20 μm）の偏光顕微鏡観察により、コア試験体の表面部および内部での骨材の反応状況と微細なひび割れの発生状況を調べた。



写真-3 H 試験体の切断面



(a) 白色灯下

(b) UV 灯下

写真-4 ゲルフルオレッセンス法による
コア（H 試験体）の観察結果

3. PC 桁の膨張率とひび割れ、骨材の反応状況

3.1 PC 桁の膨張率

PC 桁の膨張率の経時変化を図-3 および図-4 に示す。図-3 は橋軸方向、図-4 は軸直角方向の膨張率をそれぞれ示している。また、H 試験体での膨張率は、下面<側面<上面の順番で、また中央部≦端部の順番で大きくなった。また、FA 試験体はすべての部位にてコンクリートの膨張率が大きく低減されていた。H 試験体（上面）での測定方向（橋軸方向とその直角方向）の相違に関しては、直角方向の膨張率が 0.35%以上に対して、橋軸方向の膨張率は 0.04%以下となり、PC 桁の膨張率と橋軸方向のひび割れ発生に関係が認められた。一方、PC 鋼材によるプレストレスが作用しない桁端部は亀甲状（ランダム）のひび割れが発生していた。

3.2 PC 桁のひび割れと骨材の ASR 反応性

H 試験体（ASR 劣化度：大）は暴露開始後 2 ヶ月で、すでに上面に橋軸方向のひび割れが発生し、2 夏目に入るとひび割れの長さおよび本数ともに増加した。一方、FA 試験体（ASR 劣化度：ごく軽微）は 2 夏目に入り軽微なひび割れ（ヘアークラック）が観察された。

ワイヤソーで切断した H 試験体と FA 試験体（暴露 1 年間半）の切断面のひび割れと骨材周囲の ASR ゲルの生成状況を観察した。H 試験体の切断面の観察結果を写真-3 に示す。H 試験体の切断面は水あめ状の ASR ゲルが滲み出ており、全体が濡れ色を呈しているのが観察された。また、H 試験体のひび割れは、表面部の巨視的なひび割れ（幅 0.5~1.0mm，表面から 5mm~20mm の深さ）と鉄筋で拘束された微細な内部ひび割れ（目視観察不可）に識別できた。すなわち、H 試験体の表面部には大きな幅のひび割れが多数発生しているが、それらはすべてか

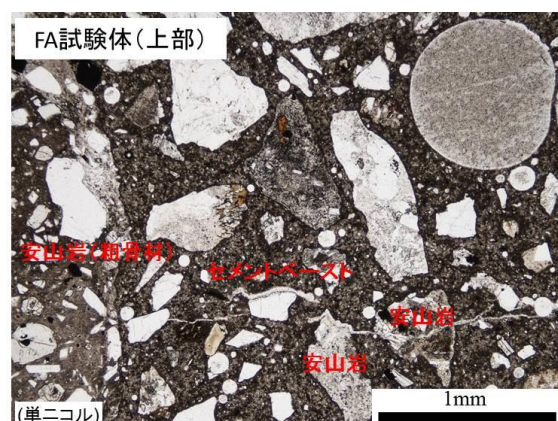
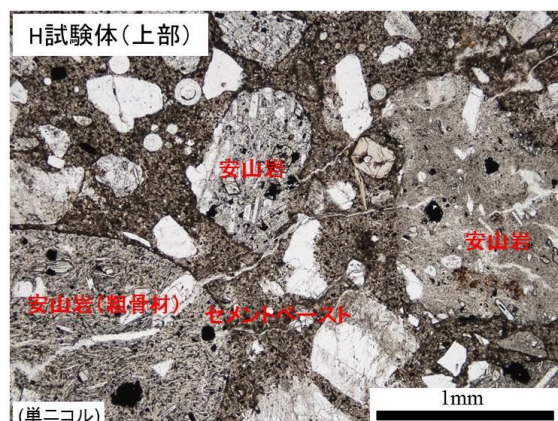


写真-5 コア薄片の偏光顕微鏡による観察結果

ぶり部分に留まっていた。

ゲルフルオレッセンス法によるコア（H 試験体）の観察結果を写真-4 に示す。H 試験体は安山岩粒子の周囲に ASR ゲルの発生が確認された。それに対して、FA 試験体は蛍光発色が全く観察されなかった。

H 試験体および FA 試験体の偏光顕微鏡による観察結果を写真-5 に示す。ASR によるひび割れ発生状況に関して、H 試験体は、川砂および川砂利中の安山岩粒子がともによく反応しており、骨材の割れと骨材界面から微細なひび割れ（幅 0.02mm 程度）が多数発生していた。それに対して、FA 試験体は、川砂中の安山岩粒子のみがわずかに反応しているだけで、内部は ASR の痕跡が観察されなかった。さらに、両試験体の表面部（20 mm 程度）は ASR ゲルの生成そのものが観察されなかった。コンクリートの表面部は、乾燥と湿潤との繰り返しによるアルカリの流出と固定化により ASR が抑制されたものと推察された⁴⁾。

4. コアの膨張率と力学的諸性質

4.1 コアの膨張率

コアの膨張率（1N・NaOH 溶液浸漬法）を図-5 に示す。常願寺川産骨材を使用した本試験体では、暴露 1 年間半において未反応の安山岩粒子が存在しているので、1N・NaOH 溶液浸漬直後から H 試験体は 0.5% 程度の大きな膨張が発生した。この値は ASTM C1260 の基準（浸漬 2 週で 0.2% 以上のものを「有害」とする）に従うと、H 試験体および FA 試験体ともに「有害」と判定された。また、H 試験体の軸直角方向の膨張率は、橋軸方向よりかなり大きくなった。この結果は、コアの採取方向による微細なひび割れの発生程度の相違、すなわち試験時の NaOH 溶液浸透度が影響していると考えられる。ASR が発生する細孔溶液の OH⁻イオン濃度の閾値に関しては、鍵本ら⁶⁾は安山岩骨材に対して 0.3 N としており、また川端ら⁷⁾は NaCl に起因する細孔溶液の OH⁻イオン濃度

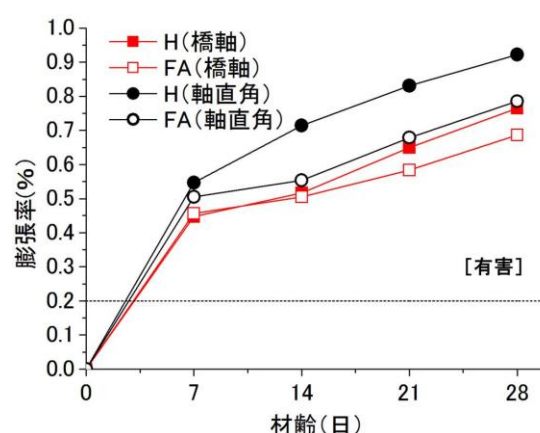


図-5 1N・NaOH 溶液浸漬試験におけるコアの膨張率

を 0.7N と推定している。したがって、1N・NaOH 溶液が試験体に浸透する段階で、未反応の安山岩が新たに ASR を発生しているものと推察できる。本試験法（通称、カナダ法）によるコアの ASR 劣化度診断の際には、このことに十分注意することが必要である。その一方で、FA 試験体は ASR 発生がごく軽微であったため、アルカリ溶液の浸透が抑制されているとともに、さらにポズラン反応の過程で生成した低 C/S 比の C-S-H のアルカリ吸着の効果が加わったので、H 試験体と比較してコアの膨張率が全体的に低減されていた。

4.2 コアの圧縮強度と静弾性係数、超音波伝播速度

コアの圧縮強度と静弾性係数、超音波伝播速度の測定値（試験体 3 個の平均値）を表-2 に示す。コアの圧縮強度は、PC 桁のコンクリートの膨張率が大きくなるほど低下した。すなわち、ASR が発生した PC 桁では、PC 鋼材の拘束力の相違により、橋軸（プレストレス）方向に対してその直角方向は圧縮強度が低下し、またその影響が端部よりも中央部に大きく現れていた。また、同一断面内の上部と下部の圧縮強度に関しては、同様に PC 鋼材の拘束力の相違により下部の圧縮強度が上部よりも大きいという結果になった。

表-2 コアの圧縮強度と静弾性係数、超音波伝播速度の測定値（試験体3個の平均値）

コア採取位置			圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)		超音波伝播速度 (m/s)	
			H	FA	H	FA	H	FA
端部	橋軸	上部	49.9	79.4	16.8	28.9	3870	4310
		下部	53.3	102.2	20.9	36.5	3990	4560
	軸直角	上部	62.0	94.5	19.2	34.2	3970	4530
		下部	69.4	103.2	18.2	38.4	3880	4790
中央部	橋軸	上部	68.0	102.0	24.2	41.1	4130	4770
		下部	75.7	89.5	27.8	42.9	4170	4800
	軸直角	上部	43.4	109.1	14.5	36.8	3820	4620
		下部	58.5	111.4	18.9	39.3	3900	4780

コアの圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度の関係を図-6に示す。両者の関係を示した本図では、測定点が健全なコンクリートを示す曲線⁹⁾から原点に近づくにつれてASR劣化度が顕著であることが知られている。ASRがごく軽微であるFA試験体は、圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度の関係が健全なものの値とほぼ一致している。その一方、H試験体は曲線から原点方向に離れた位置に分布している。これはASRにより発生した微細ひび割れや骨材界面の剥離の影響が圧縮強度および静弾性係数の低下により反映されるものであると考えられる。コアの圧縮強度と超音波伝播速度の関係を図-7、コアの静弾性係数と超音波伝播速度の関係を図-8にそれぞれ示す。超音波伝播速度は、現場計測が容易であるので、PC桁の健全度の確認に使用されている。図-7および図-8に示すように、コアの圧縮強度と静弾性係数はASRの進行にともない直線的に低下する傾向があり、両者は超音波伝播速度に対してほぼ同様な比例関係が認められる。

4.3 コアによるASR劣化度診断

曲げ載荷試験におけるPC桁の終局荷重と初期曲げ剛性(100 kN)の結果を表-3に示す。H試験体およびFA試験体ともに破壊形態は圧縮破壊であった。FA試験体(ASR劣化程度：ごく軽微)は、非反応性骨材を使用したH試験体およびFA試験体とほぼ同一の荷重-変位曲線²⁾が得られた。また、FA試験体の表面には微細なひび割れ(0.1mm以下)が発生していたが、この程度のASRひび割れであればPC桁の耐荷性および剛性に全く影響しないと考えられる。それに対して、H試験体(ASR劣化程度：大)は、上面および側面部橋軸方向にひび割れが発生し、ひび割れ幅が最大1mmに達していた。このような場合には、上記の健全な試験体と比較してPC桁の終局荷重で5%、曲げ剛性で10%の低下がそれぞれ確認された。これらの試験結果の比較より、コアの圧縮強度および静弾性係数、超音波伝播速度との対応関係を検討する際には、(1)中央部の橋軸(プレストレス)直角方向から採取したコアの圧縮強度は橋軸(プレストレス)方向(破壊荷重の推定に必要)よりも約30%減少してい

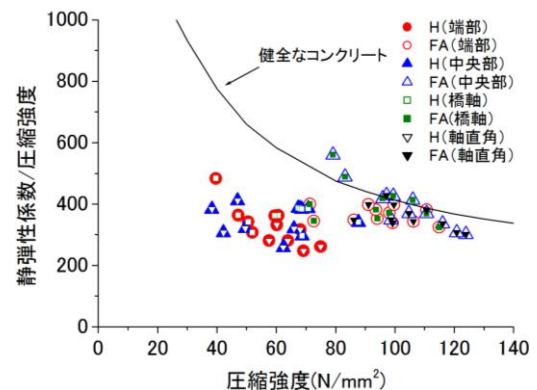


図-6 コアの圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度の関係

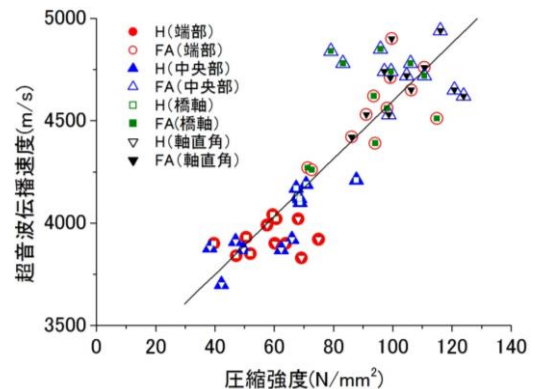


図-7 コアの圧縮強度と超音波伝播速度の関係

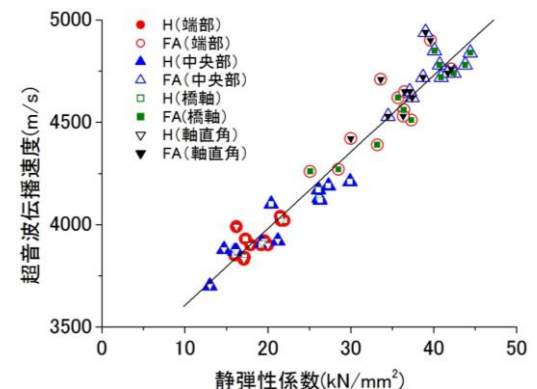


図-8 コアの静弾性係数と超音波伝播速度の関係

表-3 PC 桁の曲げ載荷試験の結果

試験体	ASR劣化度	終局荷重 (kN)	初期曲げ剛性 (kN/mm)
H	大	312	10.9
FA	ごく軽微	330	12.5

ること、また中央部と端部で比較した場合、一部の測定結果を除いて端部の圧縮強度が減少していること(2)さらに、コア採取時の水や応力解放により圧縮強度や静弾性係数などが減少する可能性があること、の2点に注意を払う必要がある。このため、ASRが発生したPC桁の耐荷性や補強を検討する際には、コアの測定値をそのまま使用するのではなく、プレストレスによる拘束度に応じて適切な補正を行うことが必要になる。さらに、PC橋梁では、写真-6に示すように、上部と下部との膨張挙動の相違が大きな変形(上ぞり)を誘発し、これに起因する損傷が新たに発生する可能性がある。したがって、PC橋梁での点検時には、桁端部の局所的な破壊やPC鋼材定着部の抜け出しなどによる損傷も同時に確認しておくことが望ましい。

5. まとめ

本研究は、ASR劣化を生じたPC・JIS桁試験体から多数のコアを採取し、コアの採取位置と方向による圧縮強度、静弾性係数、超音波伝搬速度の変化について検討したものである。

本研究より得られた主要な結果をまとめると、以下のようである。

- (1) H試験体は川砂および川砂利中の安山岩粒子がともによく反応しているのに対して、FA試験体は川砂中の安山岩粒子のみがわずかに反応していた。
- (2) H試験体では、コアの促進膨張試験(1N・NaOH溶液浸漬)において、未反応の安山岩粒子に新たなASRが発生し大きな膨張が発生していたが、FA試験体ではコアの膨張率が全体的に低減されていた。
- (3) ASRが発生したPC桁では、PC鋼材による拘束力の相違により、中央部の下部の橋軸(プレストレス)方向の圧縮強度が最も大きくなった。
- (4) コアの圧縮強度と静弾性係数および超音波伝搬速度との間には明確な比例関係が認められた。
- (5) ASRが発生したPC桁の耐荷性や補強を検討する際には、コアの測定値をそのまま使用するのではなく、プレストレスによる拘束度に応じた適切な補正を行う必要がある。

謝辞

本研究は、戦略的イノベーション創造プログラム(研



写真-6 ASRによる変形によりPC桁の端部に発生したひび割れ(定着体の破壊)

究開発課題：コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発、研究責任者：鳥居和之)の研究開発の一環として実施したものであり、関係各位に深く感謝します。

参考文献

- 1) 菊地弘紀, 山戸博晃, 広野真一, 鳥居和之: 細・粗骨材の組み合わせの組成ペシマム現象によるASR劣化事例の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1041-1046, 2016.
- 2) 山村智, 桜田道博, 小林和弘, 鳥居和之: フライアッシュコンクリートのPC橋梁への適用に関する実用化研究, プレストレストコンクリート, Vol.57, No.5, pp.46-53, 2015.
- 3) 國富康志, 石井豪, 辛軍青, 鳥居和之: ASR促進暴露試験による高炉スラグ微粉末を用いたPC梁の耐荷力特性, プレストレストコンクリート, Vol.57, No.3, pp.68-74, 2015.
- 4) 川村満紀: 現場技術者のためのASR対策ノート, 星雲社, pp.36-54, 2010.
- 5) 参納千夏男, 丸山達也, 山戸博晃, 鳥居和之: ゲルフルオレッセンス法によるASR簡易診断手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.973-978, 2013.
- 6) 鍵本広之, 佐藤道生, 川村満紀: 2, 3の異なる反応性骨材を用いたモルタルの細孔溶液の限界OH⁻イオン濃度, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.589-594, 2001.
- 7) 川端雄一郎, 山田一夫, 松下博道: セメント系材料により生成される水和物の相組成とASR抑制効果の関係, 土木学会論文集E2, Vol.69, No.4, pp.402-420, 2013.
- 8) 小林一輔, 森弥広, 野村謙二: 圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法, 土木学会論文集, No.460, pp.151-154, 1993.