論文 フライアッシュ混入が反応性骨材を用いた PC 桁の耐荷力性能に及 ぼす影響

深田 宰史^{*1}・Ha Minh Tuan^{*2}・小林 和弘^{*3}・鳥居 和之^{*4}

要旨:北陸地方では、ASR が発生した劣化橋梁が数多く確認され、それらに対する補修、架け替えの判断基準は明確になっていない。その判断材料を得るため、実際にASR が発生した PC 桁の耐荷力性能を調べる必要がある。本研究では、反応性骨材を使用した早強ポルトランドセメントにフライアッシュの混入の有無による PC 桁を2種類作製し、屋外暴露したのちに曲げ載荷試験を行い、反応性骨材を用いた PC 桁のフライアッシュの混入の有無による耐荷力性能の違いを明らかにした。その結果、フライアッシュを混入していない PC 桁の終局荷重は、混入した PC 桁に比べ約5%程度の低下していた。

キーワード: ASR, PC 桁, フライアッシュコンクリート, 曲げ載荷試験, 耐荷力性能

1. はじめに

北陸地方(福井,石川,富山,新潟)では,能登地方 に限らず,ASRによる劣化が生じた橋梁が数多く確認¹⁾ されており,それらの維持管理手法の構築が課題となっ ている。これまで反応性骨材を用いた PC 梁試験体の高 炉スラグ微粉末の混入有無による耐荷力性能に関する研 究²⁾が行われ,高炉スラグ微粉末のASRに対する抑制効 果が確認されている。北陸地方においては,高品質な分 級フライアッシュの安定供給³⁾が可能になったことから, 構造物の耐久性向上,環境負荷低減,地域産業の活性化 および地産地消の利点を生かして,フライアッシュを積 極的に使用している。その事例として,フライアッシュ コンクリートのプレキャスト PC 床版を用いた北陸自動 車道の大規模更新事業に伴う床版取替えやフライアッシ ュコンクリートを用いた PC 桁橋の架設がある⁴⁾。

このように新設橋梁に対する ASR 対策については大 きな成果を上げているが,実際に ASR が発生した橋梁に 対する補修または架け替えの判断基準は明確になってい ない。そのため,それらの判断材料を得るために ASR が 発生した実物大の PC 桁の耐荷力性能を調べる必要があ ると考えた。既往の研究において,ASR による劣化を生 じた PC 試験体を対象とした載荷試験がいくつか行われ ている ⁵⁾⁸⁾が,実物大の試験体に反応性骨材を使用して, フライアッシュの混入の有無の耐荷力性能の違いについ て調べた研究はない。

そこで本研究では、早強ポルトランドセメントに反応 性骨材を用い、フライアッシュの混入の有無による実物 大の PC 桁を 2 種類作製し、屋外暴露したのちに曲げ載 荷試験を行うことで、反応性骨材の使用により ASR 劣化 した PC 桁のフライアッシュの混入の有無による耐荷力 性能の違いを調べることにした。

2. PC 桁の概要

2.1 形状と暴露条件

本研究で作製した PC 桁は実物大の JIS A 5373-AS09 桁 とした。側面図および断面図を図-1 に示す。桁長は 9600mm,断面は上縁幅 640mm,下縁幅 700mm,高さ 450mm である。なお、本来ある横桁部の横締め用のシー ス孔は設けていない。PC 鋼材は SWPR7BL 1S12.7mm の PC ケーブルを上縁 4 本、下縁 12 本配置し、プレテンシ ョン方式によりプレストレスを導入した。

本研究では、早強ポルトランドセメントに反応性骨材 を用い、フライアッシュを混入した PC 桁(以下, FA 試 験体)と混入しない PC 桁(以下, H 試験体)の2種類 を作製した。H 試験体および FA 試験体ともに各寸法お よび配筋は同じである。

PC 桁は,打設後に蒸気養生(温度 50℃)を行ったの ち,打設後 14 時間経過後にプレストレスを導入し,約1 週間屋内にて湿潤養生した。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,屋外で暴露 した。

2.2 使用材料

PC 桁の使用材料を表-1にまとめた。反応性骨材として、常願寺川産の川砂、砕石を使用した。なお、常願寺 川産の骨材に含まれる安山岩にはクリストバライトおよ びオパールが含有している。フライアッシュは北陸電力 七尾大田火力発電所産の分級フライアッシュ(平均粒 形:7µm)を使用した。

*1 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 准教授 博士(工学) (正会員) *2 金沢大学大学院 自然科学研究科 環境デザイン学専攻 博士後期課程 *3 (株) ピーエス三菱 名古屋支店金沢営業所 (正会員) *4 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 教授 工博 (フェロー会員)



(a) 側面



(b) 断面 図-1 PC 桁の一般図(単位:mm)

表-1	使用材料

材料	記 号	仕様
セメント	С	早強ポルトランドセメント 密度:3.14g/cm ³ 比表面積:4510cm ² /g
混和材	FA	田友:5:11g/cm, 見衣面積:1510cm/g 分級フライアッシュ(七尾大田石炭火 力発電所産),密度:2.43 g/cm ³ ,比表面 積:4500cm ² /g,強熱減量値:2.0%
細骨材	S	川砂(常願寺川産) 表乾密度:2.61 g/cm ³
粗骨材	G	砕石 (常願寺川産) 表乾密度:2.61g/cm ³
高性能 減水剤	SP	マイティ 21LV(花王社製)
AE 剤	AE	ヴィンソル(山宗化学社製)

(1) 配合

両試験体は,設計基準強度を 50N/mm²とし,表-2に 示す配合とした。H 試験体は,早強ポルトランドセメン ト単味の配合である。また,FA 試験体については,ASR に対する有効性を確認した既往の研究結果⁴⁾から分級灰 の高品質化および施工性を考慮して,結合材に対するフ ライアッシュの置換率を 15%と設定した。また,ASR に よる膨張を促進させるために NaCl を等価 Na₂O 量で 13kg/m³(25.5 kg/m³)添加した。

(2) コンクリートの材料特性

コンクリートの材料特性として、早強ポルトランドセ メント単味(H試験体)と早強ポルトランドセメントに フライアッシュを混入した(FA試験体)におけるプレス トレス導入時,材齢7日,28日での圧縮強度を表-3に まとめた。材齢28日時点ではH試験体の方がFA試験体 よりも圧縮強度が大きい。

(3) 鋼材

鋼材の材料特性を表-4に示す。スターラップ鉄筋は、 SD295AのD10を用い、PC鋼材は、高強度PC鋼より線 SWPR7BL(1S12.7)を上縁4本、下縁12本を断面内に 配置し、打設後14時間経過後にプレテンション方式により1271N/mm²(導入直後)のプレストレスを導入した。

表-3 コンクリートの圧縮強度

	導入時	σ7	σ 28
H 試験体	59.3	70.3	79.8
FA 試験体	54.4	65.9	77.4

表-4 鋼材の材料特性

種別	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)		
D10	375	512		
SWPR7BL1S12.7	1832	2015		

3. 載荷試験前の状況

3.1 ひび割れ

載荷試験を行う前(暴露約1年半)のH試験体および FA試験体のひび割れ展開図を図-2に示す。なお,黒線 はひび割れ幅0.3~0.8mm,赤線は0.8mm以上を示す。 H試験体のひび割れとして,側面では下側2段と上段

表一2 配合

		如母母女	単位量 (kg/m ³)							
看別	水稻合材比 W/R	神育材 平	71	結合権	才B	細骨材	知骨材		SP	AE
「重力」	(%)	(%)	W	セメント	フライアッシュ	ли н ил S	т <u>н</u> ни G	NaCl	(B×%)	(B×%)
	(/0)	(/0)	,,	С	FA	5	U			
H 試験体	38.7	46.3	150	388		822	955	25.5	1.00	0.006
FA 試験体	34.8	44.6	150	366	65	770	955	25.5	1.20	0.02



図-2 ひび割れ展開図(上から側面北側,上面と両端面,側面南側,下面の順)

の PC 鋼線に沿って,上面では上段側面側の PC 鋼線に沿って桁軸方向のひび割れが生じている。一方,下面には 一部しか水平ひびわれが生じていなかった。このように 上面および側面に ASR のひび割れが進行した原因とし て日射や水の影響が考えられる。また,桁軸方向では PC 鋼材の付着伝達長の影響によりプレストレスが導入され ない桁端部において亀甲状のひび割れが主に見られる。

一方, FA 試験体のひび割れは、プレストレスが導入されていない桁端部と側面の一部のみであり、ひび割れの本数は非常に少なく、フライアッシュを混入したことによる ASR の膨張が効果的に抑制されている。

3.2 鉛直変位

H 試験体および FA 試験体における暴露期間での支間 中央部の反り量(鉛直変位)の推移を図-3にまとめた。 測定方法は,桁側面の両端部間に水糸を張ることにより, 支間中央側面での反り量を計測した。

H 試験体は暴露開始から反り量が増加していき,載荷 試験前までに 9mm を記録した。一方,フライアッシュ を混入した FA 試験体の反り量は,時間の経過に伴う変 化がほとんど認められなかった。

これらの反りの現象は、既往の研究²⁰においても計測 されている。本研究における H 試験体のひび割れ図から 考察すると、上面においては、とくに日射や水の影響に より ASR の進行が助長されており、これによる上面側と 下面側の膨張量の相違に加えて PC 鋼材の緊張力の差に よる偏心が反りを促進させたと考えられる。



4. 曲げ載荷試験

4.1 試験方法

曲げ載荷試験は、図-4に示すように支間長 9200mm, 載荷点間隔 1000mm とした 2 点で荷重を載荷する 4 点曲 げ載荷で荷重制御により試験を行った。支点は,丸鋼を 用いて単純支持とした。計測項目は,載荷荷重,変位(鉛 直方向),ひび割れ幅(橋軸方向)およびコンクリート表 面ひずみとした。測点の配置を同図に付記した。

4.2 荷重-変位関係

H 試験体および FA 試験体における載荷荷重と支間中 央の鉛直変位の関係を図-5 に示す。また、参考までに 設計上⁹⁾¹⁰⁾のひび割れ発生荷重(126kN)および曲げ破壊 荷重(291kN)を同図に付記した。

弾性域での曲げに関する剛性の違いについて,荷重-変位関係の傾きを調べた結果,H 試験体および FA 試験





図-5 載荷荷重と鉛直変位(支間中央)の関係

体の 50kN 載荷時は,それぞれ 11.5kN/mm および 12.8kN/mm となっており,約10%の違いが見られた。ま た,載荷試験による H 試験体および FA 試験体の終局荷 重と変位は,H 試験体の方が終局荷重で約5%程度,変 位で約10%程度小さいことから,フライアッシュを混入 したものと比較すると ASR の影響により靭性が低下し ていることがわかる。この5%の耐荷力低下は実橋を載 荷試験した既往の研究結果とも一致した⁵。

また,既往の研究のには,プレストレスによる ASR の 膨張を拘束していることにより,曲げ耐力が低下しない 試験結果もあったが,本試験結果では,そのような事実 は確認されなかった。

次に、載荷荷重と支間中央の上縁および下縁における コンクリートひずみ(桁軸方向)の関係を図-6に示す。 H 試験体および FA 試験体の初期ひび割れ発生荷重は、 それぞれ 170kN および 190kN となり、H 試験体の初期ひ び割れ発生荷重の方が小さかった。

H 試験体および FA 試験体ともに弾性域ではほぼ同じ 挙動を示しているが,H 試験体については,ひび割れ発 生荷重以降,上縁側(圧縮域)において FA 試験体より もひずみが徐々に大きくなっていることがわかる。また, 弾性域における上縁からの中立軸位置を算出したところ, H 試験体 227.5mm, FA 試験体 228.7mm となっており, 全断面有効とした 228.2mm と近い値だった。これより,



図-6 載荷荷重とひずみの関係

H 試験体の上縁および側面におけるひび割れは,弾性域 では断面2次モーメントに影響していないことがわかる。

また,設計上のひび割れ発生荷重および曲げ破壊荷重 との比較において,H試験体はどちらの値も上回ってい ることが明らかになった。ASRにより桁に無数のひび割 れが発生しても,PC鋼材の破断,腐食および鋼材とコン クリートの付着切れを生じていないことが確認できれば, 耐荷力性能は問題なく,それらを確認できる維持管理が 必要と考えられる。

4.3 ひび割れ性状

H 試験体よび FA 試験体における曲げ載荷試験後のひ び割れ図を図-7 に示す。側面のメッシュは,高さ方向 100mm (最上部だけ 50mm),橋軸方向 200mm とした。 赤線がひび割れを示し,黒線は剥離部分を示している。

H 試験体および FA 試験体の純曲げ区間の最大ひび割 れ間隔はどちらも 230mm であったが、図-7 に示すよう に H 試験体では、ASR による桁軸方向のひび割れが上面 および側面に多く発生していたため、載荷試験による曲 げひびわれは、そのひび割れの存在により連続性が途切 れたひび割れ性状を示していた(写真-1参照)。これら のひび割れが、曲げひびわれの進行を妨げていると考え られたが、後述する切断面を見る限り、曲げひび割れの 進行を妨げるまで ASR による桁軸方向のひび割れの深 さが深くないことがわかった。







写真-1 ASR による水平ひび割れと曲げひびわれ



写真-2 H試験体の切断面(中央桁との境界面)

表-5	コア採取によ	り得たコンクリ	リートの材料特性
$\overline{\mathbf{x}} = 0$	コブ抹取によ	り待たコングリ	

	圧縮強度 (N/mm ²)		静弹性係数 (kN/mm ²)		
	Н	FA	Н	FA	
端部橋軸	51.6	90.8	18.8	32.7	
端部軸直	65.7 98.8		18.7	36.3	
中央部橋軸	71.9	95.7	26.0	42.0	
中央部軸直	50.9 110.2		16.7	38.0	

4.4 切断面の状況とコア採取

載荷後の切断面の状況を確認するため、載荷試験後に ワイヤーソーにより、各桁を3150mm+3300mm+3150mm の3つに切断し、分割した各断面の状態を観察した。

端部桁と中央桁の境界にあたるH試験体の切断面を写 真-2に示す。なお、赤丸はPC 鋼線を示している。

側面や上面に存在していた桁軸方向の水平ひびわれの 深さはかぶり内の 5-20mm 程度であり、スターラップで 囲まれた範囲においてひび割れは確認できなかった。ま た、切断面を見る限り、PC 鋼線の破断は確認できなかっ たが、上縁側 PC 鋼線上において、桁軸直角方向に水平 ひび割れが生じていることを確認した(写真-2 青枠参 照)。上縁側には桁軸方向にひび割れが多数あるため、圧 壊直前にこのひび割れが発生し、圧縮域が小さくなり、 H 試験体の靭性が小さくなったと考えられる。また、曲 げ載荷試験後に、両試験体において、上縁で圧壊し、剥 離したコンクリートを取り除き、上縁側の PC 鋼材の腐 食状況を確かめたが、腐食は確認できなかった。

次に、3 つに切断した端部側の桁端断面(端部)と中 央の桁との境界断面(中央部)から、断面上部と下部か らそれぞれ3本ずつ、軸方向計6本、軸直方向計6本の コア(直径55mm,表面から約30mm以降で採取した長 さ110mm)を採取して静弾性係数、圧縮強度を調べ、そ れらの平均を表-5にまとめた。

両試験体ともに一般的な圧縮強度に対する静弾性係数 が小さい傾向にある。また、中央部と端部で比較すると 一部を除いて端部の方が圧縮強度、静弾性係数ともに小 さくなっており、特に中央部桁軸方向では、端部が中央 部に比べて3割程度小さい。また、フライアッシュ混入 により、FA 試験体の圧縮強度や静弾性係数は、H 試験体 に比べて1.3~2 倍程度大きい。材齢28日の圧縮強度(表 -3)と比較すると、H 試験体は ASR による劣化が影響
 して圧縮強度が低下したと推察される。

既往の研究¹¹から,ASR が発生した PC 試験体から採 取したコアにおいて,圧縮強度が増加し,静弾性係数が 低下した事例が報告されているが,本研究で得られた H 試験体のコアは,FA 試験体に比べ,圧縮強度,静弾性係 数ともに低下していた。また,同研究¹¹)では PC 鋼材の 拘束の影響により,採取する方向により圧縮強度が異な ることを指摘しているが,本研究からも同じ知見を確認 し,特に,断面内の上部,下部で比較したところ,断面 下部(下段 PC 鋼線上から採取)から採取した桁軸方向 の圧縮強度,静弾性係数が大きかった。

5. まとめ

本研究では、反応性骨材を用いた早強ポルトランドセ メントにフライアッシュを混入した PC 桁と混入しない PC 桁を 2 種類作製し、屋外暴露したのちに曲げ載荷試験 を行うことで、ASR による劣化を生じた PC 桁のフライ アッシュの混入の有無による耐荷力性能の違いを明らか にした。

本研究で明らかになった事項は以下の通りである。

- (1) 載荷試験前の H 試験体のひび割れは,上面,側面に おいて PC 鋼線に沿ったひび割れが見られ,プレス トレスが導入されない桁端部においては亀甲状の ひび割れが見られた。一方,FA 試験体は,フライア ッシュの混入によりひび割れの本数は非常に少な く,ASR の膨張が効果的に抑制されていた。
- (2) H 試験体は暴露開始から反り量が増加していき、載荷試験前までに 9mm を記録した。一方、フライアッシュを混入した FA 試験体の反り量は、時間の経過に伴う変化がほとんど認められなかった。
- (3) 曲げ載荷試験における弾性域での荷重-変位関係 の傾きは、FA 試験体に比べて H 試験体は約 10%低 下していた。また、終局荷重および変位は、H 試験 体の方が終局荷重で約 5%程度、変位で約 10%程度 小さい結果となり、フライアッシュを混入した FA 試験体と比較すると H 試験体は ASR の影響により 靭性が低下していた。しかしながら、H 試験体は設 計値を上回っていることを確認した。
- (4) 載荷試験後の切断面を観察した結果,側面や上面に存在していた桁軸方向のひびわれの深さはかぶり内の 5-20mm 程度であり、スターラップで囲まれた範囲においてひび割れは確認できなかった。また、PC 鋼線の破断や腐食は確認できなかったが、上縁側PC 鋼線上において、桁軸直角方向に水平ひび割れが生じていることを確認した。

謝辞

本研究は,戦略的イノベーション創造プログラム(研 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る。関係各位に深く感謝します。

参考文献

- 金沢大学 SIP-WG2:研究成果報告書-北陸地方における ASR 問題の解決を目指して-,2016.
- 2) 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.
- 橋本徹, 久保哲司, 参納千夏男:産官学連携による 北陸地方におけるコンクリートのフライアッシュ 有効利用促進に向けた取組み, 電力土木, No.361, pp.56-60, 2012.
- 4) 山村智,桜田道博,小林和弘,鳥居和之:フライア ッシュを用いたコンクリートの PC 桁橋への適用, セメント・コンクリート, No.828, pp.22-27, 2016.
- 富山潤,山田一夫,金田一男,伊良波繁雄,大城武: ASR 劣化したプレテンション PC 桁の岩石学的検討 に基づく ASR 診断および耐荷性能の評価,土木学会 論文集 E2, Vol.67, No.4, pp.578-595, 2011.
- 6) 小野里みどり、小林俊秋、小川彰一、松林裕二:ア ルカリ骨材反応により劣化を生じたプレストレス トコンクリート部材の耐荷特性、プレストレストコ ンクリート技術協会 第15回シンポジウム論文集、 pp.97-100, 2006.
- (7) 義田理希,古川柳太郎,尾花祥隆,鳥居和之:ASR による劣化を生じた PC 梁部材の耐荷力特性,コン クリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1305-1310, 2007.
- 木村嘉富,和田圭仙,青柳聖:中川橋側道橋-橋軸 方向ひび割れが生じた PC 撤去桁の載荷試験-,橋 梁と基礎, Vol.48, No.2, pp.57-60, 2014.
- 9) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 Ⅲ コンク リート橋編, 2002.
- 10) 土木学会コンクリート委員会:コンクリート標準示 方書【設計編】,2012.
- 11) 稲垣崇秀,尾花祥隆,石井豪,鳥居和之:ASR劣化
 PC 梁試験体から採取したコアの力学的性質,コンク リート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1237-1242, 2009.