

論文・報告

CfFA コンクリートを用いた高耐久プレキャスト PC 部材の普及に関する検討

Study on popularization of highly durable precast PC members using CfFA concrete

北野 勇一 *1
KITANO Yuichi

堀池 一男 *2
HORIIKE Kazuo

安彦 信吾 *3
ABIKO Shingo

水戸 健介 *4
MITO Kensuke

小川 和晃 *5
OGAWA Kazuaki

松前 幸平 *6
MATSUMAE Kohei

川田建設では、CfFA コンクリートを用いることで、塩害、凍害、ASR に強いプレキャスト PC 部材を 2015 年に開発した。この高耐久プレキャスト PC 部材の長期的な品質耐久性データを取得するため、実物大試験桁を用いた暴露試験を実施した。その結果、CfFA コンクリートは従来の早強コンクリートと同様の強度特性を確保しつつ塩分浸透抵抗性を向上させること、PC 部材としての構造性能は暴露 3 年まで従来桁と同等であることを確認した。また、実績 3 橋の施工で得られた知見より、高耐久プレキャスト PC 部材の適用性について検討した。

キーワード：CfFA コンクリート、プレキャスト PC 部材、暴露試験、耐久性

1. はじめに

プレストレストコンクリート（PC）は高強度のコンクリートと PC 鋼材を用い、プレストレス導入によりひび割れ発生を制御し、コンクリート全断面を有効に活用する構造である。また、PC 構造物は地産地消や一品生産に対応しつつ、生産性を最大限発揮するための技術改良が常に加えられてきた。このため、PC は強靱で耐久性の高い構造物を省労力かつ省資源で提供可能である。

しかしながら、SDGs や Society5.0 に代表されるように今日の社会経済情勢の急速な変化や環境への最大限の配慮に対応するためには、PC 構造物の提供に際しても技術革新によるさらなる生産性向上や品質耐久性の向上が求められる。つまり、その対応としては材料と構造の両面から未来の PC 構造物に生まれ変わることを目指すべきである。例えば、既存技術を活用した場合は、コンクリート用混和材とプレキャスト部材の同時採用が有効であると考えられる。このうち、コンクリート用混和材に関しては、石炭火力発電の副産物であるフライアッシュを用いる手段もあるが、炭種や発電状況によりフライアッシュの物性が変化し、PC 構造物の品質や生産性を損なうことも想定される。

そこで川田建設では、加熱改質フライアッシュ「CfFA」に着目し、CfFA コンクリートを用いることで、塩害、凍害、ASR（アルカリシリカ反応）に強いプレキャスト PC 部材を 2015 年に開発した^{1) 2)}。この高耐久プレキャスト

PC 部材は 2015 年度に栃木県より発注された行屋橋に初採用された（写真 1、写真 2）³⁾。

本文では、高耐久プレキャスト PC 部材の普及に向け、引き続き実施した各種検討の結果について報告する。



写真 1 高耐久プレキャスト PC 部材（行屋橋）



写真 2 行屋橋全景（2016 年撮影）

*1 川田建設㈱技術本部技術部 次長

*2 川田建設㈱プレキャスト本部生産管理部那須工場品質管理課 課長

*3 川田建設㈱東京支店工事事務課 担当工事長

*4 川田建設㈱技術本部技術部技術開発課

*5 川田建設㈱プレキャスト本部生産管理部那須工場品質管理課 係長

*6 川田建設㈱東京支店工事事務課 担当工事長

2. CfFA コンクリートの概要

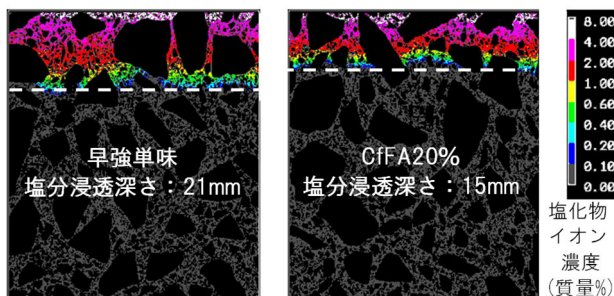
CfFA は Carbon-free Fly Ash の頭字語で、フライアッシュ原粉を 600~950 °C の高温に加熱することで未燃炭素を除去したものである (図 1)。その品質は、JIS A 6201 に規定されるフライアッシュ II 種に適合し、かつ、強熱減量を 1.0 % 以下に抑制したものである (表 1)。また、CfFA は NETIS 登録品 (QS-100005-VE) である。

当社で開発した高耐久プレキャスト PC 部材は、CfFA を早強セメントの外割 12~20 %, 水結合材比 30~40 % 程度としたコンクリートを用いる。この CfFA コンクリートは、以下の特徴がある。

- ① 塩化物イオンの浸入に対しては、早強コンクリートに比べ 1/4 以下の拡散係数となる (図 2, 表 2)。
- ② 凍結融解に対しては、空気量 4.5% の AE コンクリートとすることで、十分な凍結融解抵抗性を有する (表 3)。
- ③ ASR に対しては、CfFA を単位セメント量の外割 20 % (内割 16.7 %) とすることで、十分な ASR 抑制効果が得られる (表 4)。

また、水結合材比を 30~40 % 程度とした CfFA コンクリートは、早強セメントの外割 12~20 % の範囲において中性化が生じないことを確認している³⁾。

なお、CfFA は外割使用のため一般環境における CO₂ 排出量は削減できないが、塩害環境で拡散係数が小さい分だけ長寿命化が図れるため、PC 構造物のライフサイクルを通じた LCCO₂ は削減可能である (図 3)⁴⁾。



注) 図の上面より 10 % NaCl 水溶液に 1 年間浸せきした。塩分浸透深さは EPMA データを深さ 0.1 mm ごとに平均した塩化物イオン濃度が 0.3 kg/m³ 以上となる境界を表記した。

図 2 EPMA 面分析結果の例 (材料試験)

表 2 拡散係数算出結果 (材料試験)

配合	拡散係数(cm ² /年)
早強単味	0.60
CfFA12%	0.15
CfFA20%	0.05

注) CfFA12% と CfFA20% の拡散係数は浸せき 6 か月以前を早強単味と同じ拡散係数として 6 か月以降の拡散係数を差分法により求めた。



写真提供: 株式会社ゼロテクノ四国

図 1 CfFA の概要

表 1 CfFA 試験値の例

項目	CfFA 試験値		規格値 (II 種)
	行屋橋*	登米沢橋**	
強熱減量(%)	0.7	0.5	5.0 以下
密度(g/cm ³)	2.26	2.16	1.95 以上
比表面積(cm ² /g)	3840	3616	2500 以上
フロー値比	106	100	95 以上
活性度指数(%)	28 日	80	80 以上
	91 日	94	90 以上

* (株)ゼロテクノ四国 (現: 住友共同電力(株)) 製の CfFA

** 日本製紙 (株) 製の CfFA (試験値は入荷した平均値)

表 3 凍結融解試験結果 (材料試験)

配合	相対動弾性係数
CfFA20%	100 %

注) JIS. A 1148 A 法 (水中凍結水中融解) 300 サイクルを実施し、試験体の動弾性係数を測定した。

表 4 ASR 促進試験結果 (材料試験)

配合	膨張率
早強単味	1.0 % 以上
CfFA20%	0.0 %

注) 反応性骨材を使用したコンクリート試験体に対しデンマーク法 (50 °C の飽和 NaCl 水溶液に 91 日浸せき) による促進試験を行い、長さ変化の測定結果より膨張率を算出した。

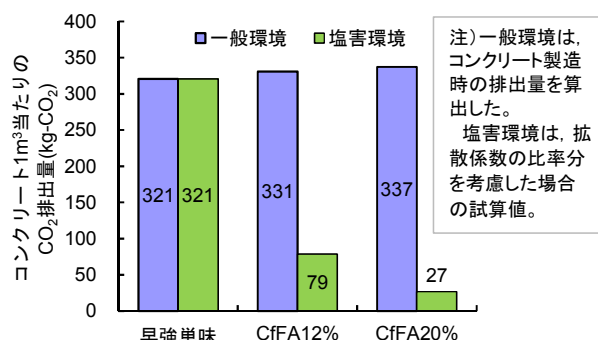


図 3 CO₂ 排出量試算例⁴⁾

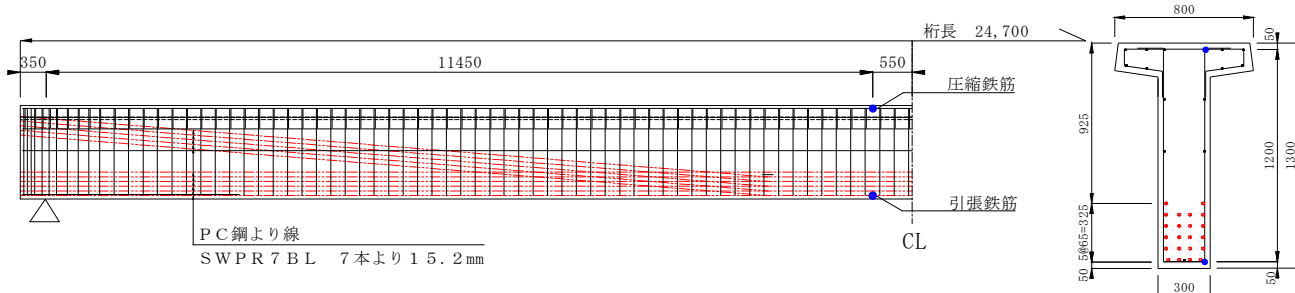


図 4 試験桁の構造一般図

3. 実物大試験桁を用いた暴露試験

(1) 実験方針

2.に示した CfFA コンクリートの特徴は、短期間で実施できる材料試験の結果に基づくものである。そこで、実構造物における長期的な品質耐久性データを取得するため、実物大試験桁と供試体を暴露試験に供した。

(2) 実験方法

試験桁の構造一般図を図 4 に示す。試験桁は支間長 24.0 m のプレテンション方式プレキャスト PCT 桁 (JIS A 5373 の BG24 適合品) とし、H 試験桁と FA 試験桁を各 1 本ずつ製作した。

コンクリート配合を表 5 に示す。H 試験桁は早強単味、FA 試験桁は CfFA をセメントの外割 12% とした CfFA12% のコンクリートを用いた。また、CfFA をセメントの外割 20% とした CfFA20% のコンクリートを含め角柱供試体を作製した。3 配合ともプレストレス導入時強度 35 N/mm²、設計基準強度 50 N/mm² を確保するため、セメント量を 422 kg/m³ に固定した。なお、スランプ 12 cm、空気量 4.5% が得られるように混和剤を調整した。

試験桁に関しては、蒸気養生を行い材齢 1 日でプレストレスを導入したのち、川田建設(株)那須工場 (栃木県大田原市) に所定の支間で支持した状態で屋外暴露し、経時的にキャンパー量の測定および載荷試験を実施した。また、暴露 3 年目に試験桁ウェブより直径 100 mm のコンクリートコアを採取した。

別途、写真 3 に示すように海岸に近接する川田建設(株)九州工場 (大分県杵築市) に 100×100×400 mm の角柱供試体を暴露し、暴露 3 年目に調査に供した。

調査は、試験桁から採取したコンクリートコアと角柱供試体を用い、圧縮強度、引張強度、静弾性係数、中性化深さおよび塩化物イオン拡散係数の各試験を実施した。

(3) 材料に関する検証結果

試験桁暴露 3 年目の強度試験結果を表 6 に示す。これによると、CfFA コンクリートの圧縮強度、引張強度および静弾性係数は、早強コンクリートと同等以上となることが確認された。また、圧縮強度の発現を図 5 に示す。図には試験桁製作時に採取したコンクリート供試体 (蒸気養生後に試験材齢まで 20℃水中の標準養生したもの)

表 5 コンクリート配合

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					対象物
		W	B		S	G	
			C	FA			
早強単味	38.4	162	422	0	765	980	H 試験桁 角柱
CfFA12%	34.2	162	422	51	706	980	FA 試験桁 角柱
CfFA20%	32.0	162	422	84	663	980	角柱

注) C : 早強セメント (密度 3.14 g/cm³)、FA : CfFA (フライアッシュ II 種、密度 2.26 g/cm³、比表面積 3 840 cm²/g)



写真 3 角柱供試体の暴露状況

表 6 強度試験結果 (暴露 3 年)

対象物	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
H 試験桁	72.8	4.22	37.3
FA 試験桁	83.3	4.62	40.5

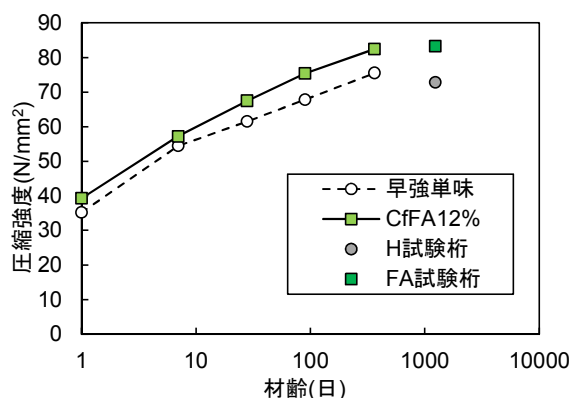


図 5 圧縮強度の発現

の試験結果を併せて示した。これによると、H 試験桁および FA 試験桁より採取したコンクリートコアの圧縮強度は、標準養生を行った供試体と同程度の強度発現が得られることを確認した。

中性化深さの調査結果を表 7 に示す。暴露 3 年時点における中性化深さは各コンクリートとも 1 mm 以下と小さい。また、CfFA コンクリートの中性化深さは暴露 3 年で最大 0.6 mm、中性化速度係数 0.35 mm/年^{0.5}であることから、暴露 100 年目の中性化深さを試算すると 3.5 mm と推定された。

海岸陸部に暴露した角柱供試体の暴露 3 年時点の塩分浸透深さと拡散係数算出結果を表 8 に示す。これによると、塩分浸透深さは早強単味で 5.9 mm となるのに対し、CfFA12%と CfFA20%で 2.7~2.8 mm と 1/2 以下に抑制された。また、拡散係数は CfFA コンクリートを用いることにより早強コンクリートの 1/7 以下に抑制されることを確認した。なお、図 2 と表 2 に比べ塩分浸透深さと拡散係数が小さい理由は、材料試験では常に塩水が供給されるのに対し、暴露試験では塩分の供給が風向に依存することや水の供給が降雨時のみであることが影響した可能性がある。

以上より、今回用いた CfFA コンクリートの強度特性は従来の早強コンクリートと同様の傾向を示すこと、塩分浸透性や中性化の暴露試験結果は 2. で得られた材料実験結果と同様の傾向を示すことが検証された。

表 9 試験桁のキャンパー測定結果

材齢 (日)	クリープ係数 設計値	キャンパー量(mm)		
		設計値	実測値	
			H 試験桁	FA 試験桁
1	—	34	47	42
14	0.7	58	53	57
28	1.0	69	53	62
90	1.3	79	69	70
365	—	—	71	70
827	—	—	72	72
1172	—	—	72	75

表 10 試験桁の載荷試験結果

材齢 (日)	ひび割れ有無	たわみ(mm)		
		設計値	実測値	
			H 試験桁	FA 試験桁
1	H 試験桁および FA 試験桁ともひび割れ無	34.4	32.6	31.8
14			29.5	29.5
28			29.4	30.2
90			28.3	28.6
365			27.4	27.4
827			27.9	27.6
1172			27.9	27.2

注) 載荷試験では設計荷重以上まで載荷してひび割れ確認とたわみ測定を行った。たわみの実測値は 318 kN に換算した。

(4) 構造に関する検証結果

試験桁のキャンパー量測定結果を表 9 に示す。FA 試験桁のキャンパー量は、H 試験桁と同様の傾向を示し、設計値におおむね一致した。また、キャンパー量から推定されるクリープ係数は図 6 に示す通りである。

試験桁の載荷試験結果を表 10 に示す。材齢 1 日から 3 年まで載荷試験を実施した結果、いずれの材齢においても、設計荷重 (318 kN) に至るまでひび割れの発生は認められず、材齢の進行に伴い曲げ剛性が向上することが確認された (図 7)。

以上より、CfFA コンクリートを用いた高耐久プレキャスト PC 部材の構造性能は、従来の早強コンクリートを用いた場合と同様の傾向を示すことが検証された。

表 7 中性化深さの調査結果 (暴露 3 年, 単位 mm)

配合	試験桁 (内陸)	角柱 (海岸)
早強単味	0.8	0.5
CfFA12%	0.6	0.4
CfFA20%	—	0.2

表 8 塩分浸透深さと拡散係数算出結果 (暴露 3 年)

配合	塩分浸透深さ (mm)	拡散係数 (cm ² /年)
早強単味	5.9	0.0257
CfFA12%	2.8	0.0035
CfFA20%	2.7	0.0036

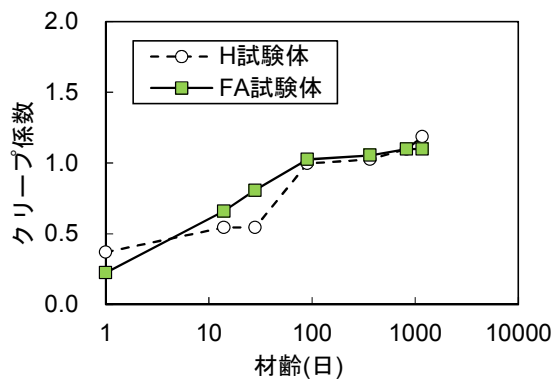


図 6 クリープ係数の推定値

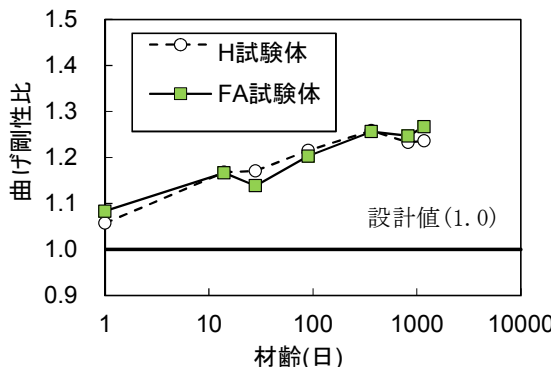


図 7 試験桁の曲げ剛性比の継時変化

4. 高耐久プレキャスト PC 部材の適用性

高耐久プレキャスト PC 部材は 3 橋の実績がある (表 11)。適用部材は、プレテンション方式 PCT 桁橋の主桁 (行屋橋) とポストテンション方式 PC コンポ橋の主桁 (登米沢橋, 掛田橋) である。このうち, PC コンポ橋は凍結抑制剤散布の影響を加味した PC 橋の仕様⁶⁾に基づき, 桁端部に塗装鉄筋を使い, かつ, コンクリート塗装を施すものであった。3 橋とも川田建設(株)那須工場にて製作した主桁部材を現場に搬入し, ポストテンション方式の PC 桁では主桁部材の組立と PC 鋼材の緊張作業を行った後, 主桁の架設を行った (写真 4~写真 6)。

ここでは, 実績 3 橋の施工で得られた知見より, 高耐久プレキャスト PC 部材の適用性について検討した。

(1) CfFA コンクリートの目標空気量

CfFA コンクリートの目標空気量は 3 橋とも $4.5 \pm 1.5\%$ であり, 実際の品質管理結果は $4.5 \pm 1.0\%$ 程度であった。また, AE 剤の使用量が大きく変動することもなく, 空気量の確保は比較的容易であった。これは, AE 剤による空気連行を阻害する未燃炭素分が CfFA では除去されていることによると考えられる (図 1)。一方, 目標空気量を 6.0%程度に引き上げる場合は, もともと粘りのある高強度コンクリートであることに加え, AE 剤使用量の大幅な増加が想定され, 適用が困難であると考えられる。

なお, 今回用いた CfFA コンクリートは空気量 4.5%でも十分な耐凍害性を有することが確認されている (表 3)。

(2) CfFA コンクリートの配合の再現性

石炭火力発電により産出されるフライアッシュの品質は日々変化するため, フライアッシュを用いたコンクリート配合の再現性が得られずに適用が困難になることも想定される。この対応としては, CfFA の使用量が 1 m^3 当たり 100 kg に満たないことから (表 5), 1 工事で必要な量をサイロに貯蔵することで CfFA コンクリートの配合の再現性を確保した。

なお, CfFA は加熱改質されたものであり, 一般のフライアッシュに比べ, 強熱減量などの品質が安定するという特長がある (表 1)。

(3) 蒸気養生した硬化コンクリート中の空気量

蒸気養生を行うことで, 硬化コンクリート中の気泡組織が変質するおそれがある。そこで, CfFA コンクリートの実配合 (表 5) を用いて調査した結果, 所定の前置き時間後に蒸気養生を行った硬化コンクリート中の空気量は 4.5 %とフレッシュ時と同程度であることが確認された (表 12)。また, 気泡間隔係数は $291 \mu\text{m}$ であり, 良質な気泡組織と判断される $300 \mu\text{m}$ 以下が得られた。

なお, 標準養生と蒸気養生を行って気泡組織を調査した結果, 適切な蒸気養生が行われる場合に関してはおおむね同じ気泡組織が得られるとの報告もある⁵⁾。

表 11 高耐久プレキャスト PC 部材の実績

橋梁名	発注者	CfFA 置換率	完成年度
行屋橋*	栃木県	12 % (外割)	2016
登米沢橋**	東北地整	20 % (外割)	2019
掛田橋**	東北地整	20 % (外割)	施工中

* (株)ゼロテクノ四国 (現: 住友共同電力(株)) 製の CfFA

** 日本製紙 (株) 製の CfFA



写真 4 主桁部材の搬入 (登米沢橋)



写真 5 PC 鋼材の緊張作業状況 (登米沢橋)



写真 6 主桁の架設状況 (登米沢橋)

表 12 気泡間隔係数の測定結果

配合	フレッシュ時の空気量 (%)	硬化コンクリート	
		空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)
CfFA20%	4.5	4.5	291

注) 蒸気養生を行った供試体を用い, リニアトラバース法 (画像解析) により空気量と気泡間隔係数を算出した。

(4) CfFA コンクリートの打設作業性

通常桁の早強コンクリートであればスランプ 12 cm で打設可能である。しかし、フライアッシュを使う場合はコンクリートの粘りが増すため、スランプを 18 cm に引き上げ、打設作業性を確保した。また、PC コンポ橋の主桁では桁高が高くウェブが薄い（写真 4）ため、通常桁と同様に、型枠振動によりコンクリートを落下させてから棒状バイブレータにて締固めを行うことで、コンクリートの充填不足を回避した。

(5) 季節変化への配合の適用性

今回のプレキャスト PC 桁は蒸気養生を行って強度発現を確保したことから、季節によって CfFA コンクリート配合を変更することはなかった。したがって、1 年を通じて同一配合により、プレキャスト PC 桁を製造することが可能である。

(6) 現場打ちコンクリートへの CfFA の適用

実績 3 橋とも、現場打ちコンクリートは普通コンクリートを用いて施工した（写真 7、写真 8）。PC 橋の架設現場ではフライアッシュコンクリートが入手出来ないケースが多く、代替案として高炉セメントを用いたコンクリートを採用することも考えられる。

なお、文献 4 には CfFA コンクリート現場施工マニュアルが示されており、未来に貢献するための地域産業に生まれ変わる切り札として、現場施工に関しても CfFA コンクリートの普及が望まれる。

(7) 高耐久プレキャスト PC 部材の適用先

プレキャスト PC 部材は、高品質の部材を全国的に供給でき、現場の生産性向上に寄与するという特長がある。ただし、CfFA とプレキャストを採用することでコストが割高になる。このため、PC 構造物のライフサイクルを通じたコスト削減や図 3 に示したように CO₂ 削減の効果が見込まれる塩害環境であるケースなど、要求される品質耐久性に応じて適材適所で利用されるのが良いと考えられる。

5. おわりに

本文では、2015 年に開発した高耐久プレキャスト PC 部材の普及に向け、引き続き実施した各種検討の結果について報告した。コンクリートは建設材料として必要不可欠であり、今後、コンクリート構造物の長寿命化や環境負荷低減、耐久性向上を図る観点から、CfFA を含めたフライアッシュがコンクリート用混和材として広く活用されることを期待する。

謝辞：本検討を行うにあたり東北大学大学院の久田真教授（CfFA 研究会・代表）、大分大学の佐藤嘉昭名誉教授（同・副代表）をはじめ関係各位のご協力を頂きました。末筆ながら感謝の意を表します。



写真 7 場所打ちコンクリートの打設状況（登米沢橋）



写真 8 登米沢橋の全景（2019 年撮影）

参考文献

- 1) 北野, 水戸: フライアッシュの品質と使用量が PC 用コンクリートの諸性状に与える影響, 第 25 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.415-418, 2016.10
- 2) 水戸, 北野, 堀池, 野村: フライアッシュコンクリートを用いた PC 試験桁の製作と載荷試験, 第 25 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.419-422, 2016.10
- 3) 水戸, 北野, 堀池: 高品質 FA コンクリートの PC 橋への適用, 川田技報, Vol.36, 技術紹介 15-2, 2017.
- 4) CfFA のコンクリートへの利用に関する研究会: CfFA コンクリートの製造マニュアル<第 1 版>, 2019.10
- 5) 北野, 池田, 岩城, 阿波: プレキャスト PC 桁における空気量と耐凍害性および塩分浸透抵抗性に関する調査, プレストレストコンクリート, Vol.57, No.2, pp.86-91, 2015.3
- 6) 東北地方整備局: 設計施工マニュアル (案) [道路橋編], p.5-14, 2016.3