

北陸産フライアッシュコンクリートの構造物への適用に関する実験的検討

(公財)鉄道総合技術研究所 修(工) ○笠倉 亮太
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 博(学) 渡辺 健
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 博(工) 岡本 大
 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 石井 秀和

Abstract : There are many researches on material properties of fly ash concrete. However, there are few studies on application to the construction of railway structures. In this paper, the compressive strength test, the compression creep test and the accelerated carbonation test were conducted on fly ash concrete for construction of railway structure in Hokuriku. As a result, the fly ash concrete with the fraction of 15% by cement weight clarified that the compression creep characteristics are not different, even the strength is lower than that of the concrete using high-early strength Portland cement. And it was regarded as an equivalent to the assumed carbonation depth in the design, although the carbonation depth is larger than that of concrete using ordinaly Portland cement.

Key words : Flyash , compressive strength , compression creep , carbonation

1. はじめに

フライアッシュ (以下, FA) を用いたコンクリートは, その材料特性に関する研究¹⁾は多いものの, 実構造物の施工を想定した検討は少ない。また, FAコンクリートは, 普通, 早強セメントを用いたコンクリートより強度発現が遅く, 中性化の進行が早いことが指摘されており²⁾, 鉄道構造物においても使用が限定的となっている。本論文では, 北陸地方における鉄道構造物の施工を想定し, 当該地域にて産出されるFA, 骨材を用いたコンクリートの強度特性および中性化特性に関する検討を実施した。

2. 使用材料および配合

本検討において使用したコンクリートの使用材料および配合を表-1~3に示す。

表-1 使用材料

使用材料	Aプラント			Bプラント	
	N(H)	N(H)+F		N(H)	N(H)+F
セメント	N(H)	普通(早強)ポルトランド			
フライアッシュ	F	-	七尾産 (JIS II種)	-	敦賀産 (JIS II種)
細骨材	S1	手取川産 (5mm)			九頭竜川下流産 (5mm)
	S2	手取川産 (2.5mm)			あわら市地内産 (1.2mm)
粗骨材	G1	手取川産 (5-25mm)			九頭竜川下流産 (25mm)
	G2	-			九頭竜川下流産 (10mm)

表-2 フライアッシュの品質

項目	規格値 JIS II種	七尾産	敦賀産
強熱減量 (%)	5.0以下	2.1	3.6
密度 (g/cm ³)	19.5以上	2.48	2.30
比表面積 (cm ² /g)	2500以上	4830	4820

表-3 配合

配合	打設時期	f'ck N/mm ²	F/ (C+F) (%)	W/C (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)							
						セメント C	混和材 F	水 W	細骨材		粗骨材		
									S1	S2	G1	G2	
A プラ ント	N	冬	27	0	53.0	53.0	306	-	162	550	239	994	-
		夏	27	0	53.0	53.0	315	-	167	535	231	994	-
		冬	36	0	44.1	44.1	372	-	164	499	216	1007	-
	N+F	冬	27	17	59.5	49.3	262	54	156	540	234	1000	-
		夏	27	25	65.7	49.3	242	81	159	524	229	1000	-
		冬	36	17	48.9	40.6	331	68	162	470	205	1013	-
		夏	36	25	54.3	40.6	304	102	165	452	198	1013	-
	H	夏	40	0	40.0	40.0	380	-	152	524	229	989	-
	H+F	夏	40	15	44.7	38.0	329	58	147	509	221	1007	-
	B プラ ント	N	冬	27	0	49.5	49.5	326	-	161	592	197	798
夏			27	0	49.5	49.5	336	-	166	584	195	790	197
冬			36	0	40.0	40.0	413	-	165	534	178	794	198
N+F		冬	27	15	55.2	47.0	288	51	159	574	192	800	200
		夏	27	25	62.6	47.0	262	87	164	563	188	786	196
		冬	36	15	47.1	40.0	344	61	162	538	179	786	196
		夏	36	25	53.2	40.0	314	104	167	528	176	768	192
H		夏	40	0	40.5	40.5	383	-	155	555	185	810	203
H+F		夏	40	15	42.3	36.0	385	68	163	480	160	810	203

f'ck : 設計基準強度

コンクリートはRC構造物を対象としたRC配合（呼び27-12-25，および36-12-25），PC構造物を対象としたPC配合（呼び40-12-25）とした。RC配合では，普通セメントを用いたコンクリート（以下，N）とセメントの一部をFAにて内割り置換したコンクリート（以下，N+F）とし，N+Fは置換率を15%（17%と25%の2水準とした。なお，置換率は，プラントごとのフレッシュ性状を考慮して定めている³⁾。なお，置換率25%としたN+Fは，置換率が圧縮強度，中性化特性に与える影響を検討するため，置換率の上昇に伴う圧縮強度管理のための水結合材比の調整は行わず，水結合材比を置換率15%（17%）と同一とした。一方，PC配合は，早強セメントを用いたコンクリート（以下，H）とセメントの一部をFAにて内割り置換したコンクリート（以下，H+F）とし，置換率は15%である。PC配合は，実施工およびPC桁施工管理の手引き⁴⁾を参考に，材齢3日での緊張力の導入を想定して $\sigma_{3d} = 34\text{N/mm}^2$ を満たす配合とした。また，RC，PC配合ともに寒冷地での施工を想定し，空気量5.5%としている。なお，全配合ともに実施工を想定しているため，当該地域の代表的2プラント（A，Bプラント）における実機練りコンクリートとした。

3. 実験概要

実験は，圧縮強度試験，静弾性係数試験，PC配合を対象とした圧縮クリープ試験およびRC配合を対象とした促進中性化試験を実施した。試験変数は，配合および養生期間である。養生方法は，実施工を想定した封緘養生とし，養生期間は，コンクリート標準示方書[施工編]⁵⁾に示される湿潤養生期間の標準（普通，早強ポルトランドセメント，混合セメントB種）を参考に想定される外気温から設定した。な

表-4 各配合の養生条件

配合	打設時期	Aプラント			Bプラント		
		F/(C+F) %	f'_{ck} N/mm ²	封緘養生期間 日	F/(C+F) %	f'_{ck} N/mm ²	封緘養生期間 日
N	冬	0	27	9	0	27	9
	夏			5			5
	冬			36			9
N+F	冬	17	27	9, 12	15	27	9, 12
	夏	25		7	25		7
	冬	17	36	9, 12	15	36	9, 12
	夏	25		7	25		7
H	夏	0	40	3	0	40	3
H+F	夏	15		3, 7	15		3, 7

お，所定の養生期間終了後は，雨掛りのない環境にて北陸地方の都市部（石川県小松市，福井県福井市）で現地曝露を実施し，所定の材齢日に試験を実施している。各配合の養生条件を表-4に示す。

圧縮強度，静弾性係数試験はそれぞれ，JIS A 1108，JIS A 1149に従った。PC配合を対象とした圧縮クリープ試験は，JIS A 1157を参考に，PC桁施工管理の手引き⁴⁾に示される導入緊張力の上限値である 20N/mm^2 を材齢3日または7日にて載荷した。RC配合を対象とした促進中性化試験は，JIS A 1152，1153を参考に91日間の促進曝露を行っている。ただし，フライアッシュのポゾラン反応を促進させる目的で，促進曝露開始は，置換率約15%，25%それぞれ材齢約200日，100日とした。促進中性化試験の試験体は，所定の養生終了後は促進曝露開始まで雨掛りのない環境に野外曝露を実施している。なお，PC配合は，低水セメント比となるため，中性化の抑制に有利となると考えられることから，RC配合の実験結果を用いて検討することとした。

4. 実験結果および考察

4.1 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度と材齢の関係を図-1，NまたはHとの圧縮強度比を図-2，圧縮強度と静弾性係数の関係を図-3に示す。なお，図-3中には，鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造⁶⁾（以下，鉄道標準）に示される圧縮強度と弾性係数の関係を併せて示す。なお，図中に示す，凡例はセメント種類_打設時期_設計基準強度 f'_{ck} _(置換率)_封緘養生期間を示している。

図-1に示す圧縮強度は，水結合材比の調整を行っていない置換率25%とした一部の配合以外は材齢28日にて設計基準強度を満足した。冬期に打設したN+Fでは， f'_{ck} によらず養生期間（9，12日）では

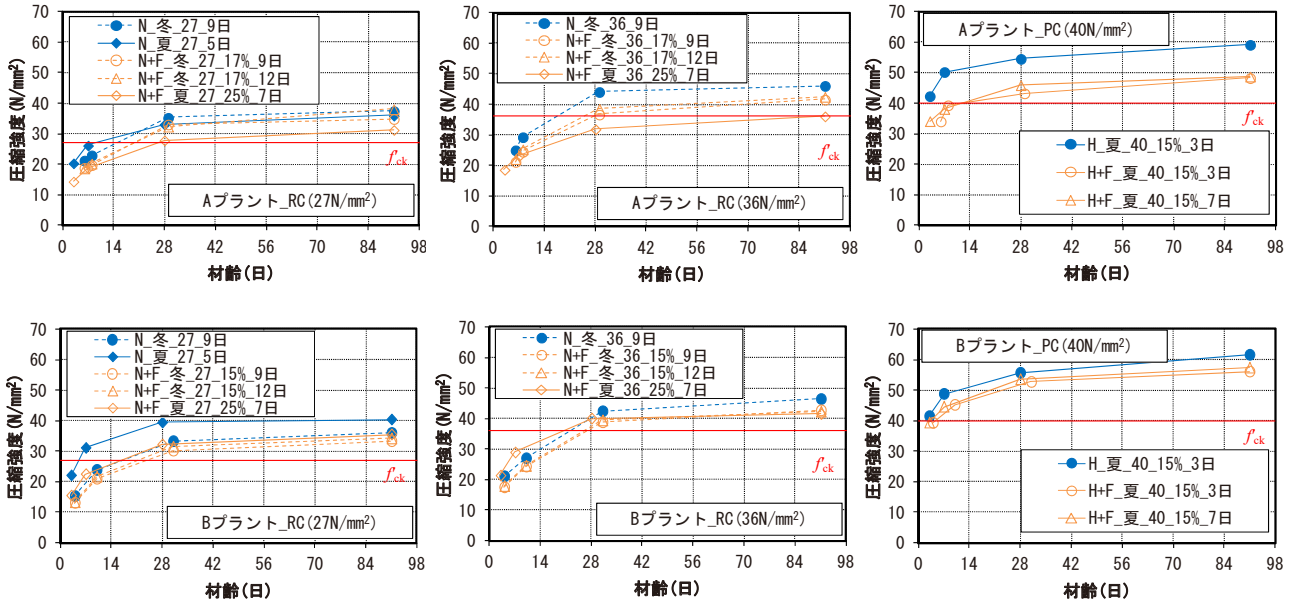


図-1 圧縮強度と材齢の関係

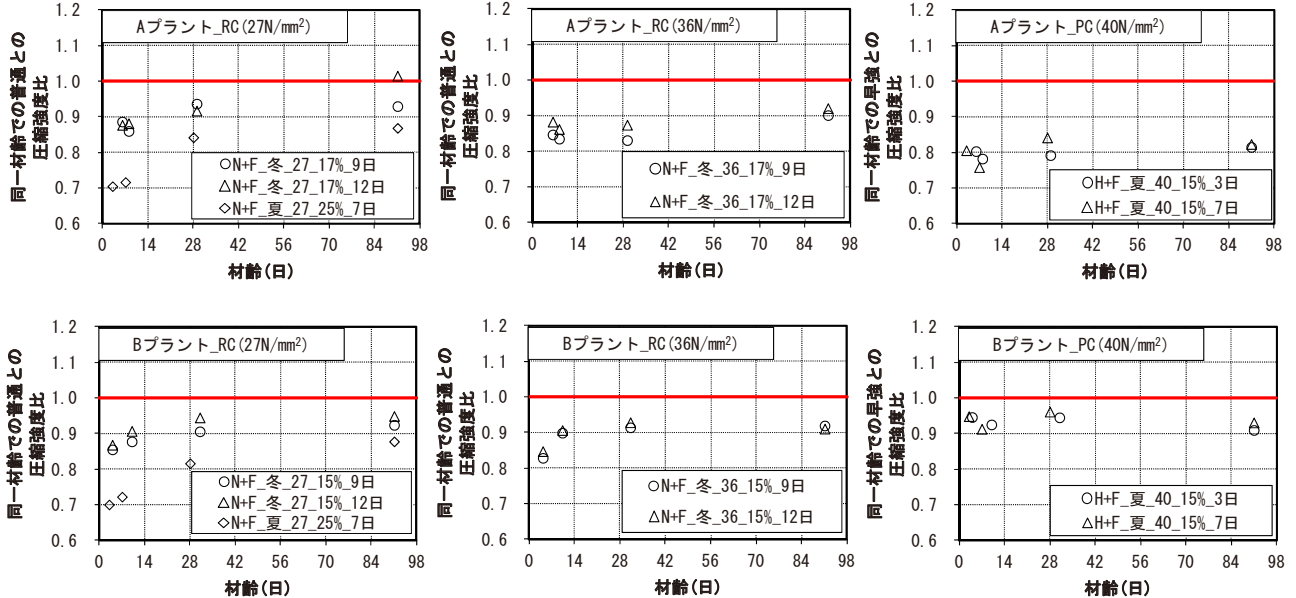


図-2 普通または早強との圧縮強度比

大きな相違は認められなかった。また、置換率約15%と25%の圧縮強度比は、Aプラントの配合では、0.9程度となり強度低下が認められたが、Bプラントの配合では1.0程度となりほぼ同等であった。置換率約15%と25%の配合では、打設時期の相違があるものの、BプラントのN打設時期による圧縮強度差を考慮すると、置換率を上げることで材齢91日までの圧縮強度は低下するものと考えられる。図-2に示すNまたはHとの圧縮強度比において、置換率約15%のRC配合では、圧縮強度比が材齢初期の0.8程度から材齢の進行とともに0.9程度と増加した。また、置換率25%の配合は、材齢初期の圧縮強度比が0.7程度に低下しているが、材齢とともに置換率約15%の圧縮強度比0.9程度に漸近した。材齢初期の圧縮強度比の低下は、打設時期の相違によるNとの圧縮強度差によるものであるが、N+Fは打設時期の温度条件に影響を受けることを示している。このため、FAコンクリートでは、置換率や環境温度に応じ、適切な材齢にて圧縮強度の特性値を設定する必要がある。一方、PC配合は、材齢91日まではA、Bプラントそれぞれ0.8、0.9とほぼ一定値を示した。単位セメント量の増加との早強セメントの使用により、材齢初期でセメントの水和反応が進んだため、初期材齢からFAのポズラン反応が促進されたものと考

えられる。なお、それぞれのプラントでの圧縮強度比の相違は、単位セメント量の相違によるものと推察される。図-3に示すN+F, H+Fの静弾性係数は、N, Hと圧縮強度が同等であれば、静弾性係数も同等であることを示している。また、図中に示す鉄道標準⁶⁾に示される値と比較し、0.85程度とやや小さい値を示している。これは、N, Hも同様な傾向であるため、FA置換に起因するものではなく、使用骨材の影響と考えられる。

4. 2 圧縮クリープ

クリープひずみを図-4に示す。なお、図中には、 $f'_{ck} = 80\text{N/mm}^2$ 以下の普通骨材コンクリートに適用可能な鉄道標準⁶⁾に示される予測式(式(1))による試算結果、持続載荷開始日の圧縮強度を併せて示している。また、鉄道標準に示される予測式は、コンクリート標準示方書[設計編]⁷⁾(以下、設計編)と同義である。

$$\epsilon'_{cc}(t, t', t_0) = \frac{4W(1 - RH/100) + 350}{12 + f'_c(t')} \log_e(t - t' + 1) \sigma'_{cp} \quad (1)$$

ここに、 ϵ'_{cc} :クリープひずみ、 t_0 , t' および t :乾燥開始時、載荷時および載荷中のコンクリートの有効材齢(日)、 W :単位水量(kg/m^3)、 RH :相対湿度(%), $f'_c(t')$:載荷開始時材齢におけるコンクリートの圧縮強度(N/mm^2)、 σ'_{cp} :持続載荷応力度= 20N/mm^2 (N/mm^2)

図-4に示すクリープひずみは、概ね持続載荷開始時の圧縮強度が小さいほど大きくなる傾向を示している。FAの置換によりHと比較し、初期の圧縮強度が低下し、クリープひずみが大きくなるものと考えられる。FAコンクリートをPC構造物に使用する場合は、適切な強度および材齢での緊張が必要となる。また、クリープひずみの予測値は、一般的に±50%程度のばらつきが報告されているが⁷⁾、H+Fのクリープひずみはその範囲内に収まっており、鉄道標準⁶⁾、設計編⁷⁾による予測値と同等としてよいものと判断される。

4. 3 中性化

(1) 中性化深さ

中性化深さを図-5に示す。なお、中性化深さは、促進中性化試験開始時の中性化深さを初期値としている。

置換率約15%, 25%としたN+Fはともに同時期に打設したNと比較して中性化深さが大きくなった。また、N+Fでは、 f'_{ck} によらず養生期間(9, 12日)では大きな相違は認められなかった。打設時期が相違するが置換率約15%, 25%を比較すると、置換率の相違による圧縮強度比がA, Bプラントでそれぞれ0.9, 1.0程度であったが、置換率25%の中性化深さが大きくなっている。置換率を上げることにより、中性化深さが大きくなったものと考えられるが、夏季打設のNの中性化深さも大きくなっており、置換率25%の促進曝露開始が置換率約15%よりも早期であったことも影響していると考えられる。このため、FAコンクリートは十分な養生を行うことが重要であると考えられる。

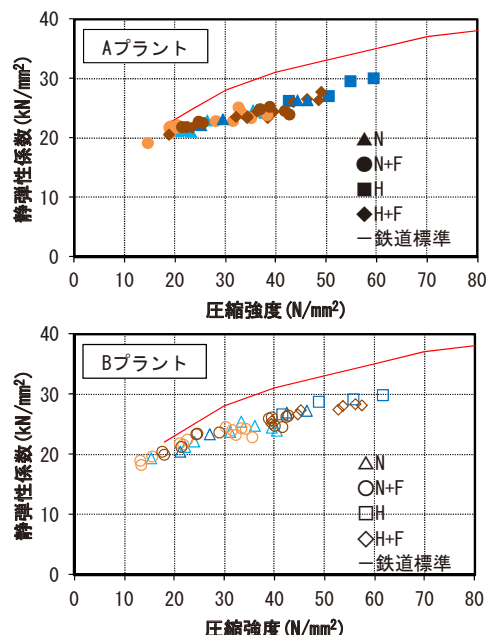


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

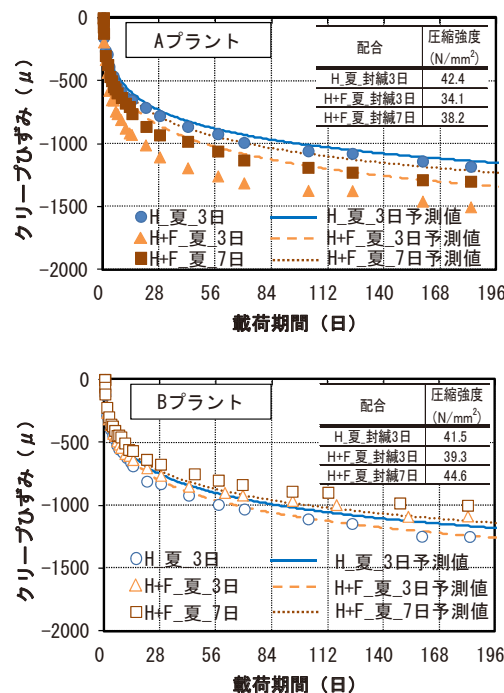


図-4 クリープひずみ

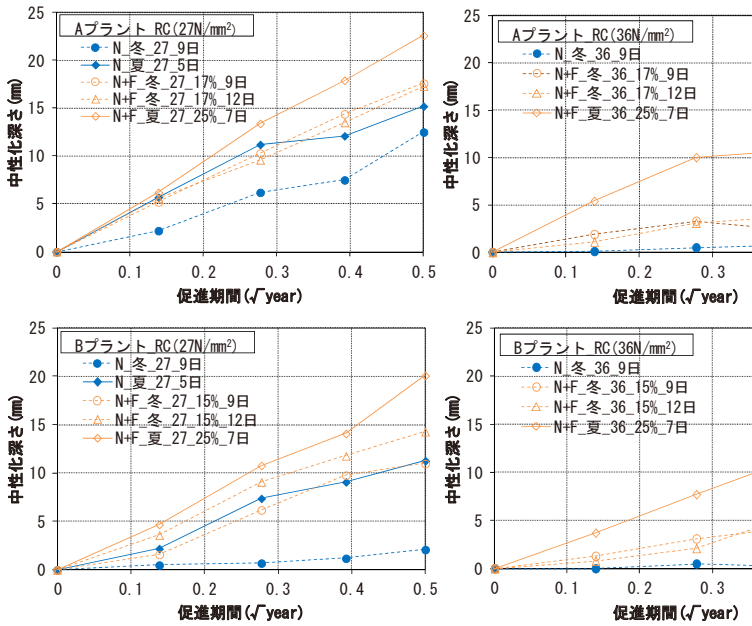


図-5 促進中性化深さ

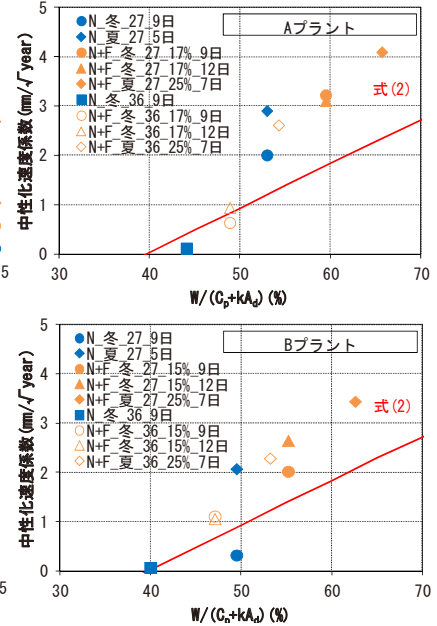


図-6 中性化速度係数と有効

水結合材比の関係

(2) 中性化速度係数

鉄道標準⁶⁾に示される中性化速度係数の予測式, 式(2)は, 実環境曝露20年の実験結果⁸⁾から算出された予測式である。本実験では, CO₂濃度5%の促進曝露試験を実施していることから, 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性設計施工指針・同解説⁹⁾に示される式(3)によるCO₂濃度補正を行った。

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0 \cdot W / (C_p + kA_d) \quad (2)$$

$$\alpha_p = \alpha_p' \sqrt{CO_2 / 5.0} \quad (3)$$

ここに, α_p : 中性化速度係数の予測値 (mm/√year), C_p : 単位セメント量 (kg/m³), k : 混和材の種類により定まる定数 (FA=0.0), A_d : 単位混和材量 (kg/m³), α_p' : 促進中性化試験による中性化速度係数 (mm/√year), CO_2 : CO₂濃度=0.04%¹⁰⁾ (%)

CO₂濃度補正を行った中性化速度係数と有効水結合材比 ($W / (C_p + kA_d)$) の関係を図-6に示す。

CO₂濃度補正を行ったNおよびN+Fの中性化速度係数は, 概ね式(2)による中性化速度係数の予測値よりも大きな値を示した。また, 有効水結合材比が大きくなると, 式(2)を超過する傾向にあるものの, CO₂濃度補正を行った実験値と予測値との相関係数は, A, Bプラントそれぞれ0.946, 0.896となり, N+Fのみの相関係数はそれぞれ0.972, 0.969となった。既往の研究⁸⁾と本実験のCO₂濃度補正を行った中性化速度係数と有効水結合材比の関係を図-7に示す。既往の研究⁸⁾と式(2)による中性化速度係数の予測値との相関係数は0.831である。本実験のN+FのCO₂濃度補正を行った中性化速度係数は, 既往の研究⁸⁾の実験結果の相関係数と同程度であり, 既往の研究⁸⁾に示される実験データのばらつきの範囲内である。このため, 本実験のN+Fの中性化速度係数は, 式(2)により評価してよいものと考えられる。

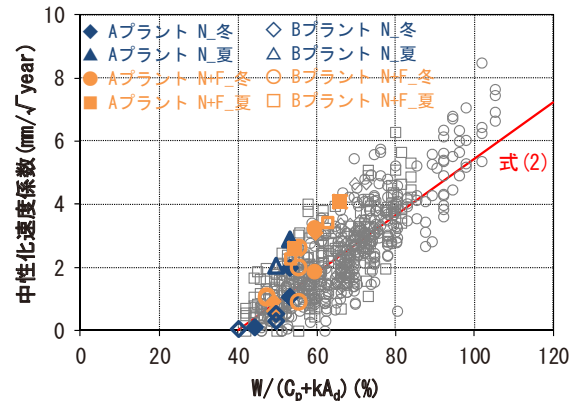


図-7 既往の研究⁸⁾との比較

5. まとめ

本論文では, 北陸地方における鉄道構造物の施工を想定し, 当該地域にて産出されるフライアッシュ

ユ、骨材を用いたコンクリートの圧縮強度試験、圧縮クリープ試験および促進中性化試験を実施した。本実験の範囲にて得られた所見を以下に示す。

- 1) 置換率約15%のフライアッシュコンクリートは、普通、早強コンクリートとの圧縮強度比が0.8から0.9程度となる。
- 2) フライアッシュコンクリートの圧縮強度に対する静弾性係数は、普通、早強コンクリートと同等であるが、鉄道標準に示される値の0.85程度となる。
- 3) 同一材齢に持続荷重を実施すると、フライアッシュコンクリートは早強コンクリートに対して同一材齢での圧縮強度が小さいため、クリープひずみが大きくなる。
- 4) フライアッシュコンクリートのクリープひずみは、鉄道標準に示される圧縮強度の特性 80N/mm^2 以下の普通骨材コンクリートのクリープひずみの予測式と同等の値となった。
- 5) フライアッシュコンクリートの中性化深さは、普通コンクリートと比較して大きくなる。
- 6) フライアッシュコンクリートの促進中性化試験から得られる中性化速度係数を CO_2 濃度により補正した場合、鉄道標準に示される中性化速度係数の予測値を超過する傾向にあるものの、予測値の算出根拠である実験データのばらつきの範囲内にある。

謝辞

本研究の実施にあたり、「コンクリート構造物の長期耐久性向上検討会」において貴重なご意見を頂きました。金沢大学鳥居和之教授をはじめ、関係者の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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：「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」-コンクリート構造物の長寿命化と環境負荷低減を目指して-報告書（富山・石川・福井版），2013
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー132 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，2009
- 3) 三倉寛明他：供試体の製作方法と養生条件がフライアッシュコンクリートの強度発現に与える影響，土木学会第71回年次学術講演会，V-135，pp.269-270，2016
- 4) (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構：PC桁施工管理の手引き，2014
- 5) (公社)土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2013
- 6) (公財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造，2004
- 7) (公社)土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013
- 8) (社)土木学会：コンクリートライブラリー第64号 フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究（最終報告書），1988
- 9) (一社)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性設計施工指針・同解説，2016
- 10) 気象庁：日本を含む北大西洋域の二酸化炭素濃度の状況，報道発表資料，2015