

フライアッシュコンクリートの 北陸新幹線への適用

米澤 豊司*1・鈴木 恒男*2・石井 秀和*3・笠倉 亮太*4

北陸新幹線（金沢・敦賀間）では、コンクリートに用いる骨材の事情が必ずしも良好といえず、アルカリ骨材反応（アルカリシリカ反応：以下、ASR）の発生が懸念された。現在は、JIS 規格により骨材の無害判定が行われ、コンクリートに含まれるアルカリ総量を 3.0 kg/m^3 以下に規制しているが、これが必ずしも ASR の抑制に結びついていないことが報告されている。

鉄道・運輸機構では、コンクリート構造物の長期耐久性の向上を図るべく、ASR 抑制対策の検討会を設立することとした。北陸地方では、良質なフライアッシュの安定供給が可能であり、フライアッシュコンクリート（以下、FA コンクリート）による ASR 抑制対策が構築されつつあったことから、対策として FA コンクリートを用いることを念頭に、FA コンクリートの基本特性を把握することを目的に試験を行った。本稿では、検討会を経て決定した ASR 抑制対策の要否判定の方法、FA コンクリートの各種試験結果の報告、およびその結果を踏まえた北陸新幹線のコンクリート構造物への適用について解説する。

キーワード：アルカリ骨材反応（ASR）、フライアッシュコンクリート、北陸新幹線

1. はじめに

現在、工事を進めている北陸新幹線（金沢・敦賀間）は、工事延長 114.4 km（うち石川県 40.2 km、福井県 74.2 km）であり、平成 34 年度末の完成を目指し工事を進めている（図 - 1）。平成 29 年 6 月現在、工事区間のうち 87% の工

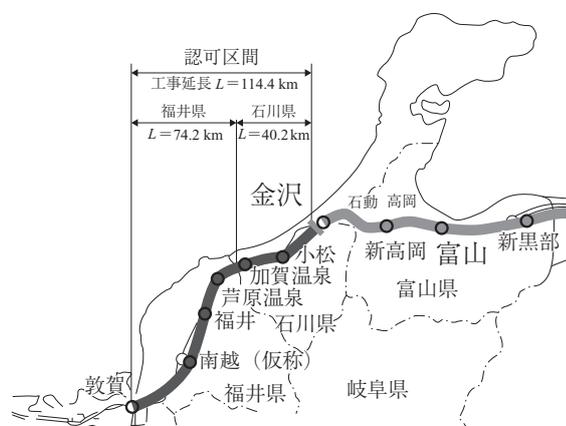


図 - 1 北陸新幹線（金沢・敦賀間）のルート

事発注を完了しており、今後、ますますの工事の本格化が見込まれる。しかしながら、北陸地方はコンクリートに用いる骨材の事情が必ずしも良好とはいえず、ASR の発生が懸念された。そのため、コンクリート構造物の長期耐久性の向上を図ることが北陸新幹線（金沢・敦賀間）建設の課題となった。

2. ASR 抑制対策に関する検討会の設立経緯

鉄道・運輸機構ではこれまで ASR の抑制対策^{たとえ1)}として、①コンクリートに含まれるアルカリ総量を 3.0 kg/m^3 に規制すること、②JIS A 5211「高炉セメント」に適合する高炉セメント B 種（スラグ混合比 40% 以上）または C 種、もしくはフライアッシュセメント B 種（フライアッシュ混合比 15% 以上）または C 種を使用すること、③JIS A 1145「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法）」あるいは JIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルパー法）」により無害と判定された骨材を用いることとし、①または②を優先することとしてきた。

しかし、これらの抑制対策にはいくつかの課題があげられている。たとえば、①については外部環境や骨材由来の



*1 Toyoji YONEZAWA

(独)鉄道・運輸機構
大阪支社



*2 Tsuneo SUZUKI

(独)鉄道・運輸機構
設計部設計第一課



*3 Hidekazu ISHII

(独)鉄道・運輸機構
設計部設計第一課



*4 Ryota KASAKURA

(公財)鉄道総合技術研究所
構造物技術研究部

アルカリ量が考慮されていないこと、②については混和材の安定した供給が確保されなければならないこと、③についてはモルタルパー法の場合、判定までに時間を要すること、また化学法も含めて、無害と判定された骨材を用いたにもかかわらず ASR が発生している事例が報告されている²⁾ ことである。

北陸地方では、良質なフライアッシュの安定した供給が可能な環境であること、FA コンクリートによる ASR 抑制対策が構築されつつあることから³⁾、北陸新幹線（金沢・敦賀間）における ASR 抑制対策を検討するため、（公財）鉄道総合技術研究所、学識経験者、鉄道事業者、鉄道・運輸機構による検討会を設立することとした。検討会では、新幹線構造物に対する FA コンクリート適用の可否と、適用条件を課題として検討を進めた。そのために、FA コンクリートの基本特性を把握すべく各種試験を行った。

3. 北陸産 FA コンクリートの基本特性の把握⁴⁾

3.1 コンクリート配合の設定

鉄道・運輸機構では鉄道構造物等設計標準による性能照査に対応したコンクリートの配合条件を定めているため、FA コンクリートに対しても、性能照査に対応した配合条件を設定する必要がある。従来からの RC 構造物用の配合条件は、設計基準強度 27 N/mm²、スランプ 12 cm、空気量 5.5 %、W/C 53 % 以下、単位水量 175 kg/m³ 以下であり、各プラントでこの条件に合致するような FA コンクリートの配合を設定した。また、中性化対策として積極的に W/C を下げなければならない場合を想定して 36 N/mm² についても設定した。PC 構造物用は設計基準強度 40 N/mm²（実施工に基づき 3 日強度 $\sigma_3 = 34 \text{ N/mm}^2$ ）、W/C 50 % 以下とし、その他は RC 構造物用と同様である。なお、水セメント比 W/C は水結合材比 W/C+FA に読み替えるものとし、セメントの一部をフライアッシュにて内割り置換とした。対象地域は石川県、福井県として、それぞれ代表となるプラントを選出し、フライアッシュの置換率については各プラントの実績によるものとした。配合は表 - 1 のとおりである。混和剤は AE 減水剤、AE 助剤を用いる。

表 - 1 コンクリートの配合
(a) RC 配合

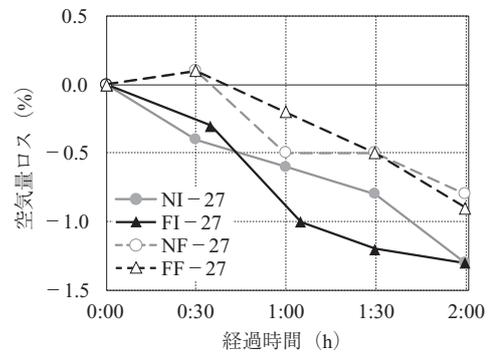
対象地域	配合表記	配合	呼び	FA 置換率 (%)	水結合材比 (%)
石川	NI-27	N	27-12-25N	0	53
	FI-27	N+F		17	49.3
	NI-36	N	36-12-25N	0	44.1
	FI-36	N+F		17	40.6
福井	NF-27	N	27-12-25N	0	49.5
	FF-27	N+F		15	47
	NF-36	N	36-12-25N	0	40
	FF-36	N+F		15	40

(b) PC 配合

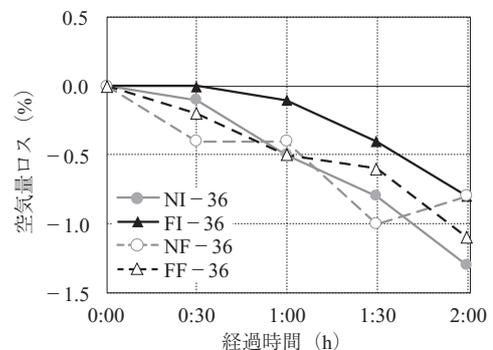
対象地域	配合表記	配合	呼び	FA 置換率 (%)	水結合材比 (%)
石川	HI-40	H	40-12-25H	0	40
	FI-40	H+F		15	38
福井	HF-40	H		0	40.5
	FF-40	H+F		15	36

3.2 フレッシュ性状の把握

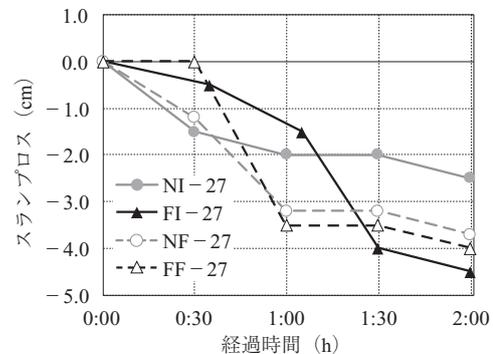
フレッシュ性状の把握のため、空気量ロスとスランプロスを計測した。練上りから 30 分後を現地到着時間と想定して、そこから 30 分ごとに計測を行った。日平均気温は 3.1 ~ 5.6 °C であった。試験結果を図 - 2 に示す。



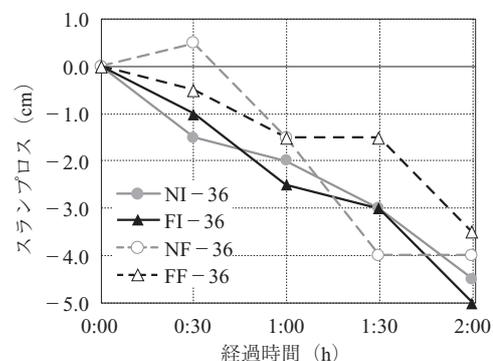
(a) 空気量ロス (呼び強度 27 N/mm²)



(b) 空気量ロス (呼び強度 36 N/mm²)



(c) スランプロス (呼び強度 27 N/mm²)



(d) スランプロス (呼び強度 36 N/mm²)

図 - 2 コンクリートのフレッシュ性状の経時変化

空気量ロスは普通コンクリート (N) と FA コンクリート (F) ではほぼ同程度である。一方、スランプロスは、1.5時間以降大きくなっているケースが見受けられた。この原因としては、AE 減水剤種類とフライアッシュの相性と考えられる。そのため、混和剤種類と使用量により、普通セメントと同程度まで制御することが可能であると考えられる。

併せてブリーディング量も確認しているが、普通コンクリートと FA コンクリートで同等という結果であった。

3.3 硬化特性およびクリープ特性の把握

圧縮強度の試験を行った。試験体諸元を表 - 2 に示す。置換率 (W/B を一定)、養生期間をパラメータとし、試験材齢は、3, 7, 28, 91 日とした。

材齢の経過に伴う圧縮強度の変化の計測結果を図 - 3 に示す。いずれも設計基準強度を満足しており、圧縮強度は普通または早強コンクリートの方が FA コンクリートに比べて大きい結果となった。その強度比は 0.8~0.9 程度となった。

PC 配合に対しては、圧縮クリープ試験を行った。載荷応力度は実状の導入緊張力より 20 N/mm² とし、各供試体の養生期間後に載荷する。試験結果を図 - 4 に示す。載荷期間は、約 6 ヶ月までを示している。クリープひずみの予測値は、鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造)⁵⁾ (以下、RC 標準) に基づき算定した。一般的に、

載荷開始時におけるコンクリートの圧縮強度が小さいほど、クリープひずみが大きくなる傾向にあると考えられ、石川の配合についてはそのとおりの結果となっているが、福井の配合については、FA コンクリートの 3 日強度が普通コンクリートに近かったため、クリープひずみが小さくなったものと考えられる。また、クリープひずみの予測値は、±50% 程度のばらつきが報告されている⁶⁾ が、本試験結果はその範囲内に収まっており、FA コンクリートにおいても、RC 標準による予測式を適用して良いものと考ええる。

3.4 中性化特性の把握

中性化特性を把握すべく促進中性化試験を行った。促進開始材齢を 200 日、促進期間を 3 ヶ月とし、測定材齢は促

表 - 2 試験体諸元

配合	打設時	f _{ck} N/mm ²	置換率 (%)		封緘養生 (日)	グラフ中の凡例
			石川	福井		
N	冬	27	0	0	9	①
		36			9	②
N + F	冬	27	17	15	9	③
					12	④
		36	17	15	9	⑤
					12	⑥
H	夏	40	0	0	3	⑦
					7	⑨
H + F	夏	40	15	15	3	⑧
					7	⑨

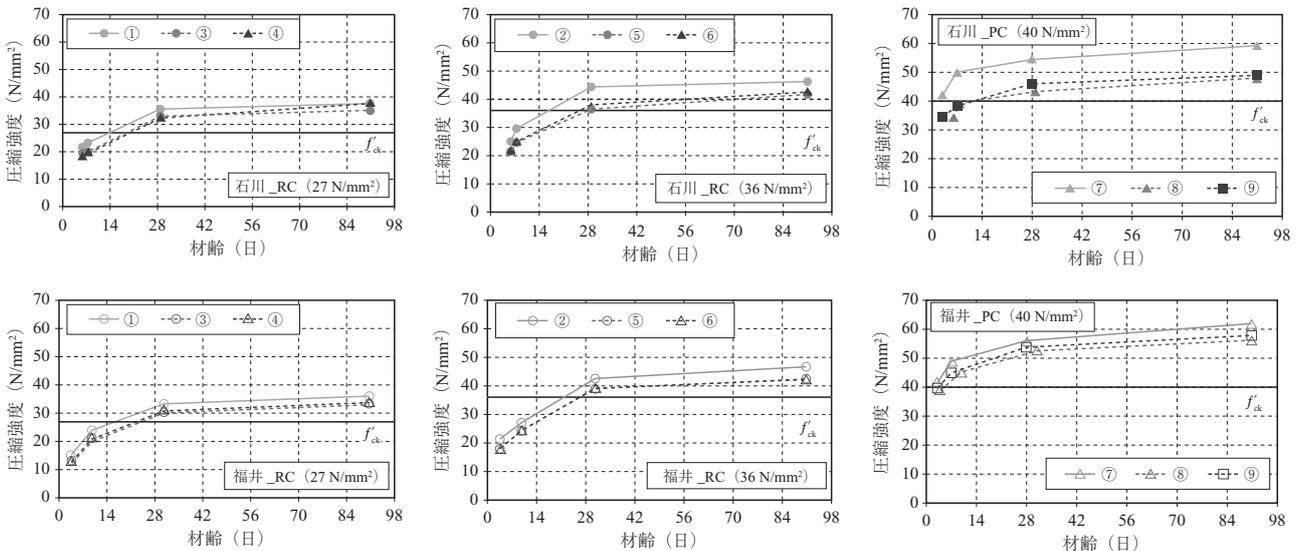


図 - 3 圧縮強度と材齢の関係

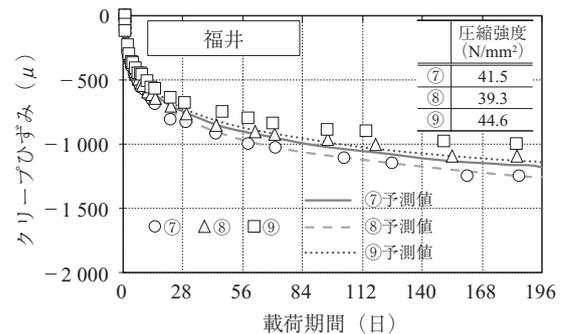
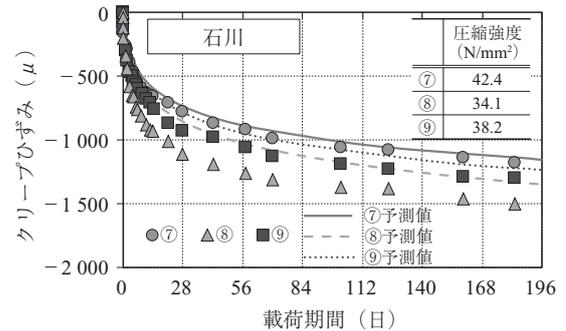


図 - 4 クリープひずみの経時変化

進開始後 7, 28, 56, 91 日とした。試験結果を図 - 5 に示す。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。FA コンクリートは、普通コンクリートと比べて中性化深さは大きくなる傾向であり、封緘養生期間 9 日 (t9) と 12 日 (t12) の違いによる大きな差は無かった。

次に各試験値から算出される中性化速度係数について、予測値や既往の研究のデータと比較した。予測値は、実環境曝露 20 年の実験結果⁷⁾に基づく、以下の RC 標準の予測式から算出される。

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

α_p : 中性化速度係数の予測値 (mm/ $\sqrt{\text{year}}$), C_p : 単位セメント量 (kg/m³), k : 混和材の種類により定まる係数, A_d : 単位混和材量 (kg/m³) とする。なお、係数 k はフライアッシュの場合は $k=0.0$ と設定されるが、本試験結果からも、この値が妥当であることを確認している。

また、本試験では、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⁸⁾ に示される以下の式により、CO₂ 濃度補正を行った。

$$\alpha_p = \alpha_p' \sqrt{\text{CO}_2/5.0}$$

α_p' : 促進中性化試験による中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{year}}$), CO₂: CO₂ 濃度 = 0.04%⁹⁾ とする。

中性化速度係数と有効水結合材比の関係を図 - 6 に示す。

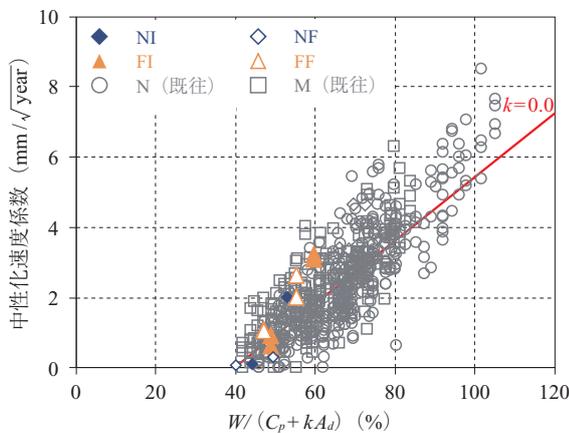
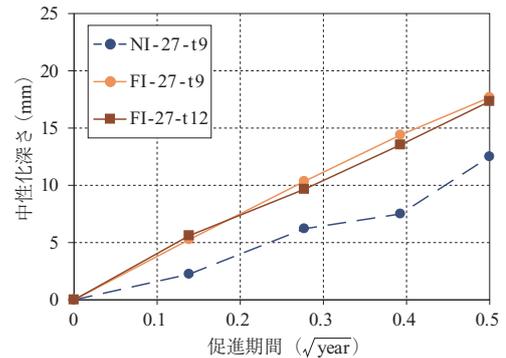


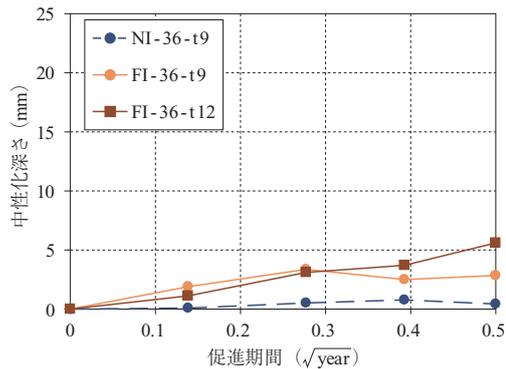
図 - 6 中性化速度係数と有効水結合材比の分布

図中の実線は RC 標準の予測式による値を示しており、本試験結果は CO₂ 濃度補正を行った値をプロットしている。おおむね予測値より試験値が上回る結果となり、既往の研究⁷⁾ に示される実験データのばらつきの範囲内であることから、中性化速度係数は RC 標準に基づく予測値により、評価可能と考える。

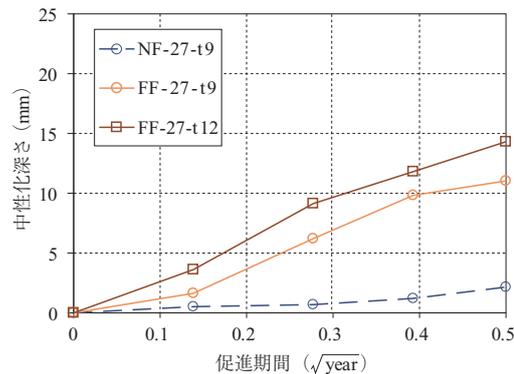
中性化深さの推定値は、中性化速度係数から算出されることから、中性化深さの推定値も中性化速度係数と同様、RC 標準に基づく予測値で評価可能と考える。そのため、中性化深さの制限値から最大水結合材比 (W/B) を算出



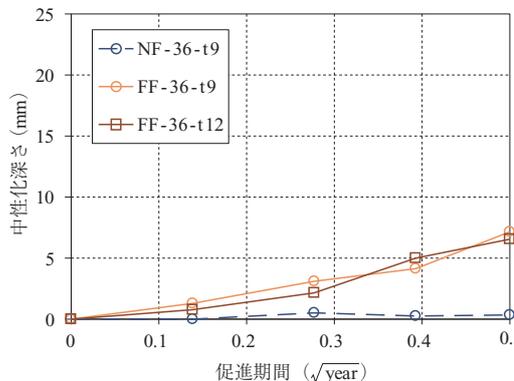
(a) 呼び強度 27 N/mm² 置換率 15% (石川)



(b) 呼び強度 36 N/mm² 置換率 15% (石川)



(c) 呼び強度 27 N/mm² 置換率 17% (福井)



(d) 呼び強度 36 N/mm² 置換率 17% (福井)

図 - 5 促進中性化試験の結果

した。

ラーメン高架橋を例として、供用 100 年とした場合の水

結合材比による中性化深さの試算結果を図 - 7 に示す。フライアッシュのセメント置換率は、 W/B を従来の W/C と同程度で設計基準強度を満たすべく、15~17% を想定した。図中の y_{lim} は、部材ごとの設計かぶりから、施工誤差 10 mm、中性化残り 10 mm を差し引いて、中性化が許容される深さの限界値を示したものである。各部材ごとに y_{lim} から求まる最大水結合材比を一覧表にしたものが表 - 3 である。この結果を基に、RC 構造物のうち、気中構造物の W/B を 50% 以下、地中構造物の W/B を 55% 以下

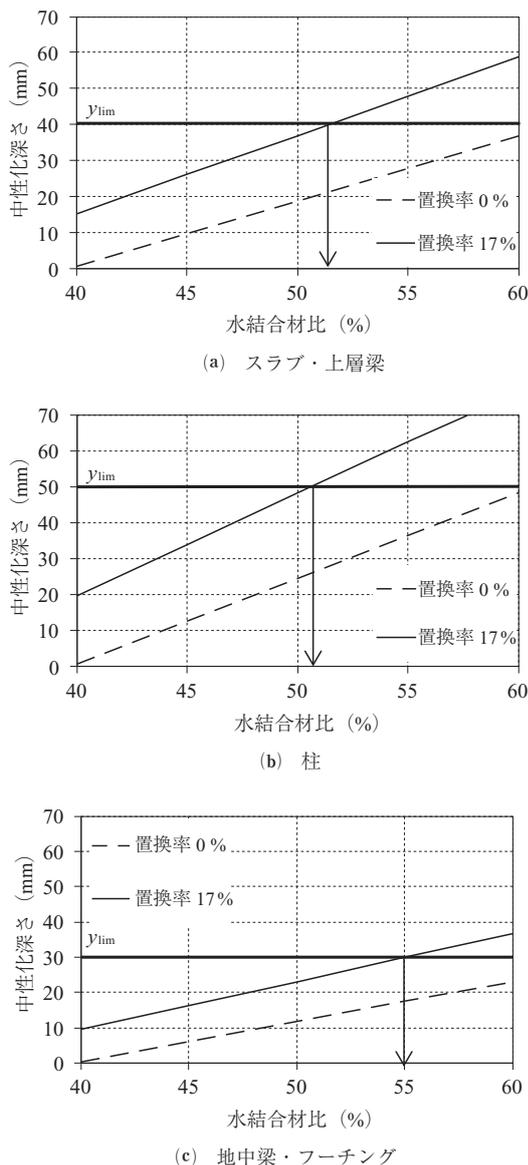


図 - 7 水結合材比による中性化深さの試算結果

表 - 3 中性化深さから求まる最大水結合材比一覧

構造物種別	部材名称	y_{lim} 以下となる W/B		
		10%	15%	17%
ラーメン 高架橋	スラブ	55.3	52.2	51.4
	上層梁・中層梁			
	柱	54.5	51.5	50.7
	地中梁・フーチング	59.1	55.8	55.0

と決定した。PC 構造物についても同様の過程を経て、 W/B を 47% 以下と決定した。

以上の試験結果から、FA コンクリートは施工性に問題なく (3.2)、構造設計上の配慮を要しないことから力学的性能的に適用可能であり (3.3)、普通コンクリートに比べて中性化耐性は劣るものの W/B を制限することで適用可能 (3.4) と判断した。

4. ASR 抑制対策の要否の判定

JIS 規格では、骨材の ASR 判定区分は「無害」または「無害でない」の 2 区分である。化学法においては、溶融シリカ量 (Sc) ≥ 10 mmol/l かつアルカリ濃度減少量 (Rc) < 700 mmol/l のとき、溶融シリカ量 (Sc) の値がアルカリ濃度減少量 (Rc) より小さい骨材が無害、モルタルバー法においては、材齢 26 週後の膨張率が 0.10% 未満であれば無害と判定される。

一方、東日本旅客鉄道株式会社では JIS 規格で無害と判定された骨材を用いた場合においても ASR が発生したため²⁾、東日本旅客鉄道株式会社土木工事標準仕様書 (平成 27 年 2 月)¹⁰⁾ (以下、JR 東仕様書) では、骨材の判定を「有害」、「準有害」、「無害」の 3 区分としている。鉄道工事として判定を統一した方が良いと判断し、鉄道・運輸機構においてもこの 3 区分とし、その判定区分についても JR 東仕様書と同様とした (表 - 4)。

表 - 4 骨材判定区分

区分※	化学法
TU 有害	溶融シリカ量 $Sc \geq 10$ mmol/l かつアルカリ濃度減少量 $Rc < 700$ mmol/l のとき、 $Rc \leq Sc$ である骨材
準有害	$Sc \geq 10$ mmol/l かつ $Rc < 700$ mmol/l のとき、 $Sc < Rc \leq Sc + 50$ である骨材
TU 無害	$Sc \geq 10$ mmol/l かつ $Rc < 700$ mmol/l のとき、 $Sc + 50 < Rc$ である骨材、 $Sc < 10$ mmol/l かつ $Rc < 700$ mmol/l である骨材

区分※	モルタルバー法
TU 有害	膨張率が 26 週で 0.1% 以上、もしくは膨張率が 26 週で 0.05% 以上~0.10% 未満であっても 13 週から 26 週までの膨張率の増加割合が 8 週から 13 週までの増加割合に対して大きい骨材
準有害	膨張率が 26 週で 0.05% 以上~0.10% 未満かつ 13 週から 26 週までの膨張率の増加割合が、8 週から 13 週までの増加割合に対して小さい骨材
TU 無害	膨張率が 26 週で 0.05% 未満の骨材

※ TU は鉄道・運輸機構の頭文字であり、JIS と区別するために表記する。

また、同文献²⁾ではアルカリ総量が 3.0 kg/m³ であっても、ASR が発生したとして、JR 東仕様書ではセメントに含まれるアルカリ総量の規制を 2.2 kg/m³ としている。

機構でも ASR 抑制のため、これに準じて、次のとおり対策することとした。

「準有害」と判定された骨材を使用する場合は、① コンクリート中のアルカリ総量を Na_2O 換算で 2.2 kg/m³ とすること、または、② 高炉セメント (JIS R 5211 B 種 (スラグ混合比 40% 以上) または C 種) あるいはフライアッシュセメント (JIS R 5213 B 種 (フライアッシュ混合比 15% 以上) または C 種)、もしくは混和材をポルトランドセメ

ントに混入した結合材でアルカリ骨材反応抑制効果の確認されたものを使用することとした。この場合、用いるフライアッシュの品質はJIS I種またはJIS II種とし、JIS II種については比表面積が4 000 cm²/g以上とすることとした。

「TU有害」と判定された骨材を使用する場合は、上記②による対策を行うこととした。

5. 施工上の留意点

FAコンクリートの基本特性の把握のために行った試験を踏まえて、施工において次のことを留意することとした。

1) FAコンクリートについては、練り混ぜてから打ち終わるまでの時間を1時間以内とすることが望ましい。これを超える場合は、適切な混和材を使用して出荷時のスランプおよび空気量を上げるなど、これらの経時変化に一層配慮すること。

2) FAコンクリートの打込み時の温度は、原則として10℃以上とすること。5～10℃になる場合は養生方法および養生期間について検討してから施工を行うこと。

3) 圧送に長い配管を要する場合は、圧送性、コンクリートの性状変化を事前に確認し、施工計画に反映すること。

上記に加えて、FAコンクリートの施工性、品質および実施工における問題点の有無の確認を目的として、FAコンクリートによる実構造物の試験施工を行っている。対象構造物は、ラーメン高架橋1連および橋脚1基とした。試験施工の予定期間は平成29年2月から同年12月までとなるため、平成29年6月現在、地中構造物の施工のみではあるが、施工者からは、FAコンクリートコンクリートは普通コンクリートと比べると粘性があるが、打設の作業性や施工スピードについて、普通コンクリートとの差異は感じられないと報告を受けている。

今後は、気中構造物の施工となることから、施工性だけでなく出来栄についても検証していくことを考えている。

6. おわりに

北陸新幹線（金沢・敦賀間）においては、ASR発生が懸念されたため、コンクリート構造物の長期耐久性を向上するべく検討会を設立した。検討会の提言によるASRの抑制対策の変更点は次のとおりである。

- 1) 骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法またはモルタルバー法）による判定区分を、JIS規格の2区分（無害、無害でない）から3区分（無害、準有害、有害）に細分化した。
- 2) 「準有害」として判定された骨材を使用する場合は、アルカリ総量を2.2 kg/m³以下とする。または混合セメントを使用する。
- 3) 「有害」として判定された骨材を使用する場合は、混合セメントを使用するものとする。

北陸地方は良質なフライアッシュが入手できることから、混合セメントとしてフライアッシュセメント、もしくは、混和材としてフライアッシュを混入した結合材を適用することを可能とした。

FAコンクリートの利用の条件は次のとおりとした。

- 1) 使用するフライアッシュの品質はJIS I種、またはII種とし、II種の場合は、粉末度の比表面積を4 000 cm²/g以上とする。
- 2) フライアッシュのセメント置換率は15～17%とする。
- 3) 地中構造物の最大水結合材比は55%以下とする。
- 4) 気中構造物の最大水結合材比は50%以下とする。
- 5) PC構造物の最大水結合材比は47%以下とする。
- 6) FAコンクリートの養生条件・養生期間は、高炉セメントコンクリートに準じるものとする。

参考文献

- 1) (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。
- 2) 松田芳範，隈部佳，木野淳一，岩田道敏：アルカリ骨材反応のJR東日本版抑制策の制定について，コンクリート工学，Vol.50，No.8，2012.8。
- 3) 久保哲司，参納千夏男，蟹谷真生，鳥居和之：フライアッシュコンクリートの社会実装を目的とした技術開発—北陸地方での経緯と実績—，コンクリート工学，vol.54，No.9，2016.9
- 4) 笠倉亮太，渡辺健，岡本大，石井秀和：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，第26回プレレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，2017.10
- 5) (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。
- 6) (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。
- 7) (株)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酸化と鉄筋の発錆に関する長期研究（最終報告書），1988。
- 8) (一社)日本建築学会：鉄筋コンクリート造構造物の耐久性設計施工指針・同解説，2016。
- 9) 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。
- 10) 東日本旅客鉄道(株)：東日本旅客鉄道株式会社土木工事標準仕様書（平成27年2月）

謝 辞

北陸新幹線（金沢・敦賀間）における構造物へのフライアッシュコンクリートの適用性の検討につきまして、多大なるご指導・ご助言をいただきました「コンクリート構造物の長期耐久性向上検討会」に参画されました金沢大学鳥居教授ならびに委員の皆様と、資料のご提供、ご助言をいただきました東日本旅客鉄道(株)構造技術センターに心から感謝の意を表します。

【2017年8月31日受付】