

第10回 コンクリート技術交流会 パネルディスカッション

第II部 コンクリートクライシスから40年，コンクリートの耐久性は如何に

話題提供 耐久設計の導入，課題

1

安藤ハザマ

福留 和人

2024.10.4

土木学会：耐久設計の変遷

1980制定 標準示方書(昭和49年制定、55年改定)

- 耐久性を考慮して配合設計:主に気象(凍結融解)作用
- 水密性:W/C上限、海洋:W/C上限、かぶり最小値
- 海砂中の塩化物量の制限、骨材の反応性の規定無し

1983～:コンクリート構造物の早期劣化問題

- アルカリ骨材反応、塩害(海砂からの塩分、飛来塩分)による劣化
- 原因のひとつ — 配合設計:強度が主で、耐久性は特殊な条件のみ考慮

1986制定 標準示方書(昭和61年制定)

- コンクリート中の塩化物量の総量を規制、付録に維持管理(案)
- コンクリートの品質に耐久性、鋼材を保護する性能が加わる
- 反応性骨材、アルカリ骨材反応対策(骨材、セメント、混和材)
- 水密性:W/C上限、海洋:W/C上限、かぶり最小値は、ほぼそのまま

1992コンクリート構造物の維持管理指針(案)、耐久設計指針(案)

1996制定 標準示方書(平成8年制定) — 耐久性を考慮した配合設計

1999制定 標準示方書(平成11年制定) — 耐久性照査型 (概念導入)

2001制定 標準示方書(維持管理編)

2002制定 標準示方書 — 性能照査型設計への移行 2007制定 ~設計編へ

2007～2022制定 標準示方書 — 水の浸透に伴う鋼材腐食考慮(2017) その他見直し

コンクリート標準示方書

性能照査型設計への移行

(1999年制定：概念導入、2002制定：改定)

2007制定 改訂：耐久性の照査：設計編に組込む

安全性の照査
照査

設計断面力 << 設計断面耐力

耐久性の照査
照査

劣化の程度の設計値 << 限界値

耐久性に関する照査

設計値

- ・塩化物イオン濃度の設計値 C_d など
- ・中性化深さの設計値 y_d

設計限界値

- 鋼材腐食発生限界
- ・限界塩化物濃度 C_{lim}
- ・限界中性化深さ y_{lim}

↳ 照査 $\gamma_i C_d / C_{lim} \leq 1.0$ ←

$\gamma_i y_d / y_{lim} \leq 1.0$

構造物係数 γ_i

塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0$$

C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値

C_{lim} : 鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度

γ_i : 構造物係数

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right)$$

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k + \left(\frac{w}{l} \right) \cdot \left(\frac{w}{w_a} \right)^2 \cdot D_0$$

D_d : 設計拡散係数

D_k : 拡散係数の特性値

t : 設計耐用年数

w : ひび割れ幅

w_a : 許容ひび割れ幅

D_0 : ひび割れの影響

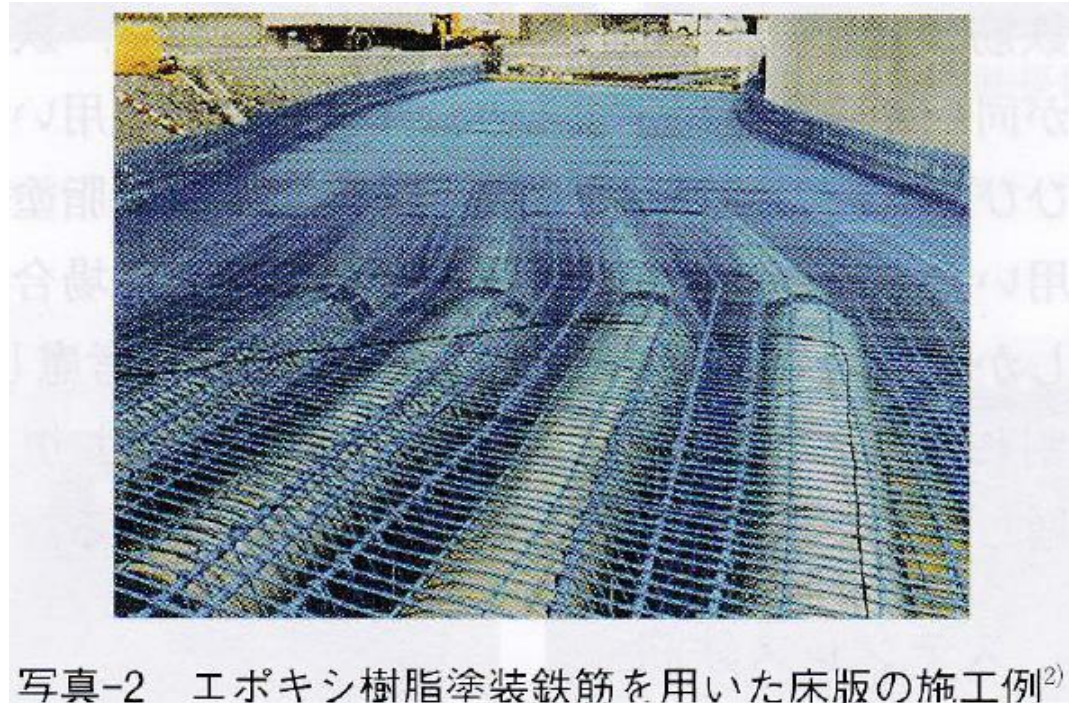
土木学会：耐久設計の導入

海洋環境など、厳しい環境条件

第2種防食 コンクリート以外を併用



エポキシ塗装鉄筋，ステンレス鉄筋の使用
表面保護工，電気防食工法などの対策



中性化に伴う鋼材腐食に対する照査

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} < 1.0$$

y_d : 中性化深さの設計値 $= \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \cdot \sqrt{t}$

t : 設計耐用年数

α_d : 中性化速度係数の設計値 $= \alpha_k \cdot \beta_c \cdot \gamma_c$

α_k : 中性化速度係数の特性値

β_c : 環境作用を表す係数, γ_c : 材料係数

y_{lim} : 鋼材腐食発生限界深さ $= C_d - C_k$

C_d : かぶりの設計値 $=$ かぶり $c -$ 施工誤差 ΔC_e

C_k : 中性化残り, 通常環境10mm, 塩分環境下 **10~25mm**

γ_i : 構造物係数

中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査

⇒鋼材腐食深さが限界値に達しないことを照査(2017制定～)

$$\gamma_i \frac{S_d}{S_{lim}} < 1.0$$

S_d : 鋼材腐食深さの設計値 $S_d = \gamma_w \cdot S_{dy} \cdot t$

$S_{dy} \cdot t = 1.9 \cdot 10^{-6} \cdot \exp\{-0.068 \cdot (c - \Delta c_e)^2 / q_d^2\}$: 1年あたりの鋼材腐食深さの設計値

γ_w : 安全係数, t : 耐用年数, c : かぶり, Δc_e : かぶりの施工誤差

q_d : **水分浸透速度係数の設計値** = $\gamma_c \cdot q_k$, q_k : **水分浸透速度係数の特性値**

S_{lim} : 鋼材腐食深さの限界値

γ_i : 構造物係数

アルカリシリカ（骨材）反応に対する照査

2002年標準示方書：中性化や塩害と同様の照査

照査方法：所定期間の膨張率が許容値以下

$$\gamma_p L_p / L_{max} < 1.0$$

2007年制定～2017年制定標準示方書：

構造物にアルカリ骨材反応を発生させないことを基本的な考え方

アルカリシリカ（骨材）反応に対する照査を除外

①使用材料の選定において無害な骨材を選定

②骨材選定が困難な場合：アルカリ骨材反応抑制対策を採ること



2022年制定：改定資料：中性化や塩害と同様の照査とすべき

$$\gamma_i \varepsilon_d / \varepsilon_{lim} < 1.0$$

ただし、膨張率の予測精度 → 導入見送り

アルカリシリカ(骨材)反応抑制対策

- **骨材の選定による対策**

骨材の反応性試験で「無害」と判定された骨材のみを使用

- **低アルカリ型セメントの使用による抑制対策**

JISに規定されているNa₂O当量0.6%以下の低アルカリセメントを使用

- **アルカリシリカ(骨材)反応抑制効果を示す混合セメントによる抑制対策**

高炉セメントB種あるいはC種、またはフライアッシュセメントB種またはC種を使用

- **コンクリートのアルカリ総量の規制**

下式で計算されるアルカリ総量R_tを3.0kg/m³以下とする。

$$R_t = R_2O/100 \times C + 0.9 \times Cl^- + R_m$$

ここに、R₂O:セメント中のアルカリ量(%), C:セメント量(kg/m³), Cl⁻:塩化物イオン量(kg/m³)、
R_m:混和剤に含まれるアルカリ量(kg/m³)

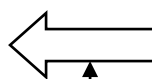
北陸地方の取り組み

[北陸の地域特性]

産学官連携委員会の設立

1. 全国的にみてASRの発生が多い地域
2. 飛来塩分による塩害が多い地域

抑制可能



社内研究

3. 北陸地域の再生資源としてのフライアッシュ (地産地消)

地域貢献

[産学官連携委員会]

「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」(H23.1設立)

— 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 —

委員長(金沢大学 鳥居和之教授)

産業界

- ・富山県生コンクリート工業組合
- ・石川県生コンクリート工業組合
- ・福井県生コンクリート工業組合
- ・北陸電力株式会社

大学

- ・金沢大学
- ・金沢工業大学
- ・富山県立大学
- ・福井大学
- ・石川高専

官公庁(オブザーバー)

- ・国交省(北陸地整)
- ・富山県
- ・石川県
- ・福井県



第1回委員会の様子(H23.1.24)

【概略スケジュール】

		H22	H23	H24	H25	H26	H27以降	備考		
委員会		第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回予定	1回/年の頻度で開催
対象地域	富山・石川									七尾灰
	福井									敦賀灰
国交省										

凡例

委員会活動

使用に向けた諸試験・試験施工の実施

モデル工事の実施

北陸地方の取り組みのまとめ

<フライアッシュ供給体制と品質>

- ・高品質で安定した品質のフライアッシュ供給体制確立 6万トン／年。

<フレッシュコンクリートの特性>

- ・単位水量を低減できる。
- ・比表面積が高いため、粘性がやや高くなり、ブリーディングも低減される。
- ・フライアッシュの品質変動が小さく、スランプ空気量の管理も問題ないという感触。

<硬化コンクリートの特性>

- ・初期強度以外全項目でNセメント，全項目でBBセメントコンクリートと同等以上
- ・特に，ASR抑制効果，遮塩性，ひび割れ低減に優れている。



- ・JIS認証工場の拡大（75工場：富山28，石川26，福井21）
- ・『石川県七尾，南加賀地区：モデル地区』石川県発注⇒FAコン
- ・富山県，福井県，石川県：発注者が指定したモデル工事
⇒ フライアッシュコンクリートの標準使用

フライアッシュの利点の再確認

— 塩化物浸透抑制効果 —

表-1 示方配合表

配合区分	W/C (%)	W/(C+F) (%)	s/a (%)	海砂:砕砂 (%)	単体量 (kg/m ³)					AE 減水剤 ×(C+F)%
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	フライアッシュ <i>F</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	
B0	56.0	—	47.2	65:35	169	302	—	860	979	0.4
F1	70.0	56.3	47.6	65:35	172	245	60	852	955	0.4
F2	59.3	46.7	40.0	50:50	175	295	80	688	1052	0.6

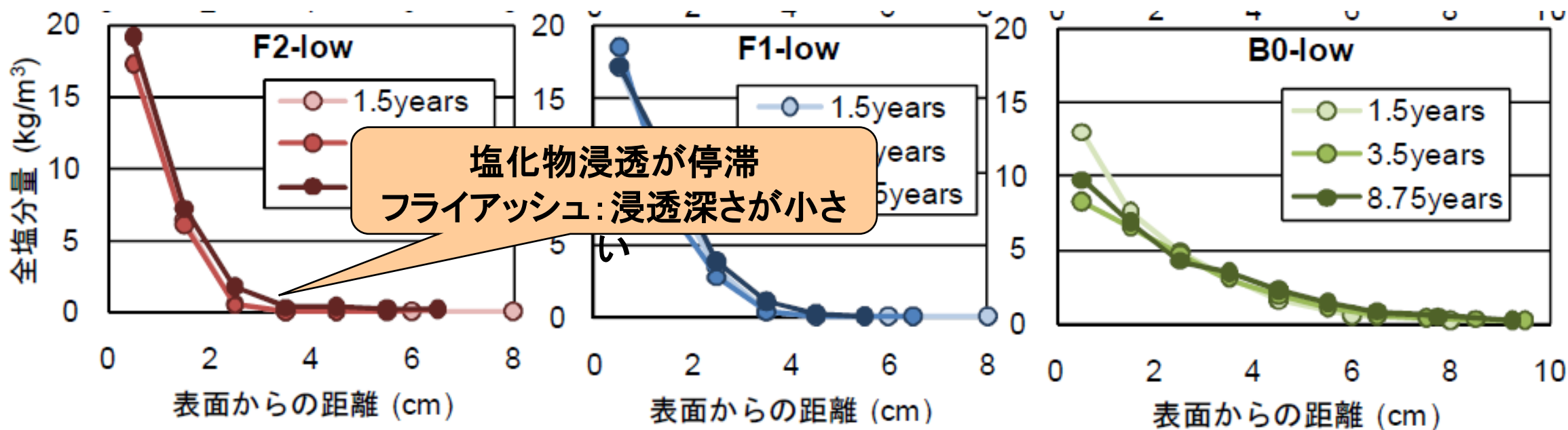
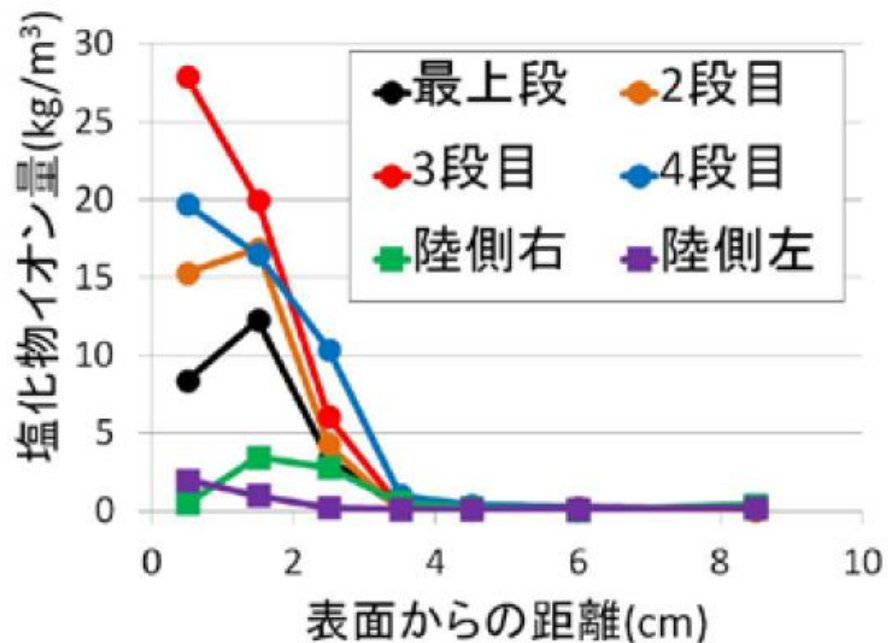


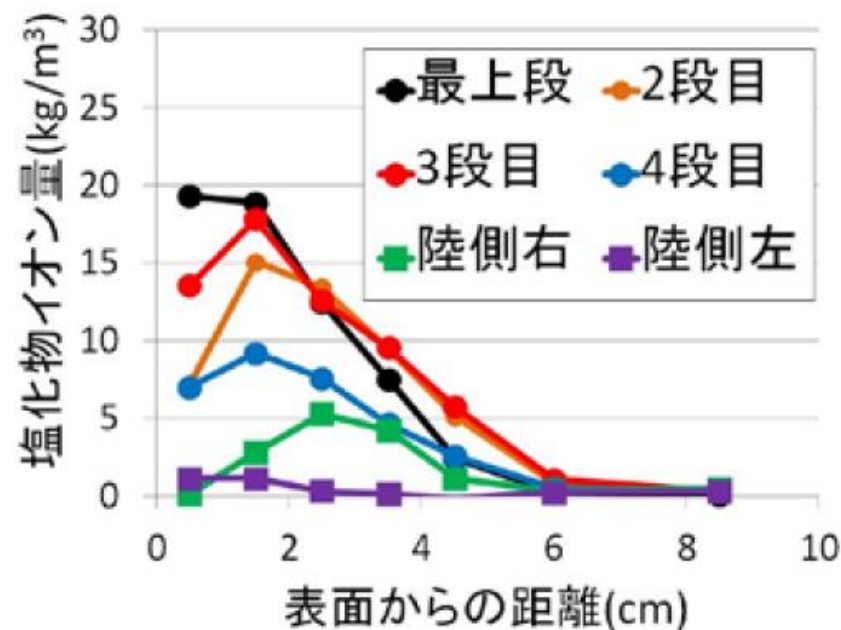
図-6 コア的全塩化物イオン量分布

フライアッシュの利点の再確認

— 塩化物浸透抑制効果 —



フライアッシュコンクリート



高炉セメントコンクリート

停滞深さ $N > BB > F$
➔ フライアッシュの塩化物浸透抑制効果大

フライアッシュの利点の再確認

— 塩化物浸透抑制効果 —

土木学会：コンクリート標準示方書2012年制定 拡散係数 D_k 算定式の見直し

普通ポルトランドセメント	N	$\log D_k = 3.0(W/C) - 1.8$
高炉セメントB種(SF含む)	BB	$\log D_k = 3.2(W/C) - 2.4$
フライアッシュセメントB種	F	$\log D_k = 3.0(W/C) - 1.9$

かぶりの設計値 C_d **BB < F ≒ N**
フライアッシュの抑制効果は評価されない

実構造物のデータ蓄積・発表が必要

フライアッシュの利点の再確認

— 塩化物浸透抑制効果 —

土木学会：コンクリート標準示方書2022年制定 拡散係数 D_k 算定式の見直し

$$D_k = \gamma_k \cdot \gamma_p \cdot D_p \quad , \quad D_p(t) = D_r(t) \cdot t^{k_D}$$

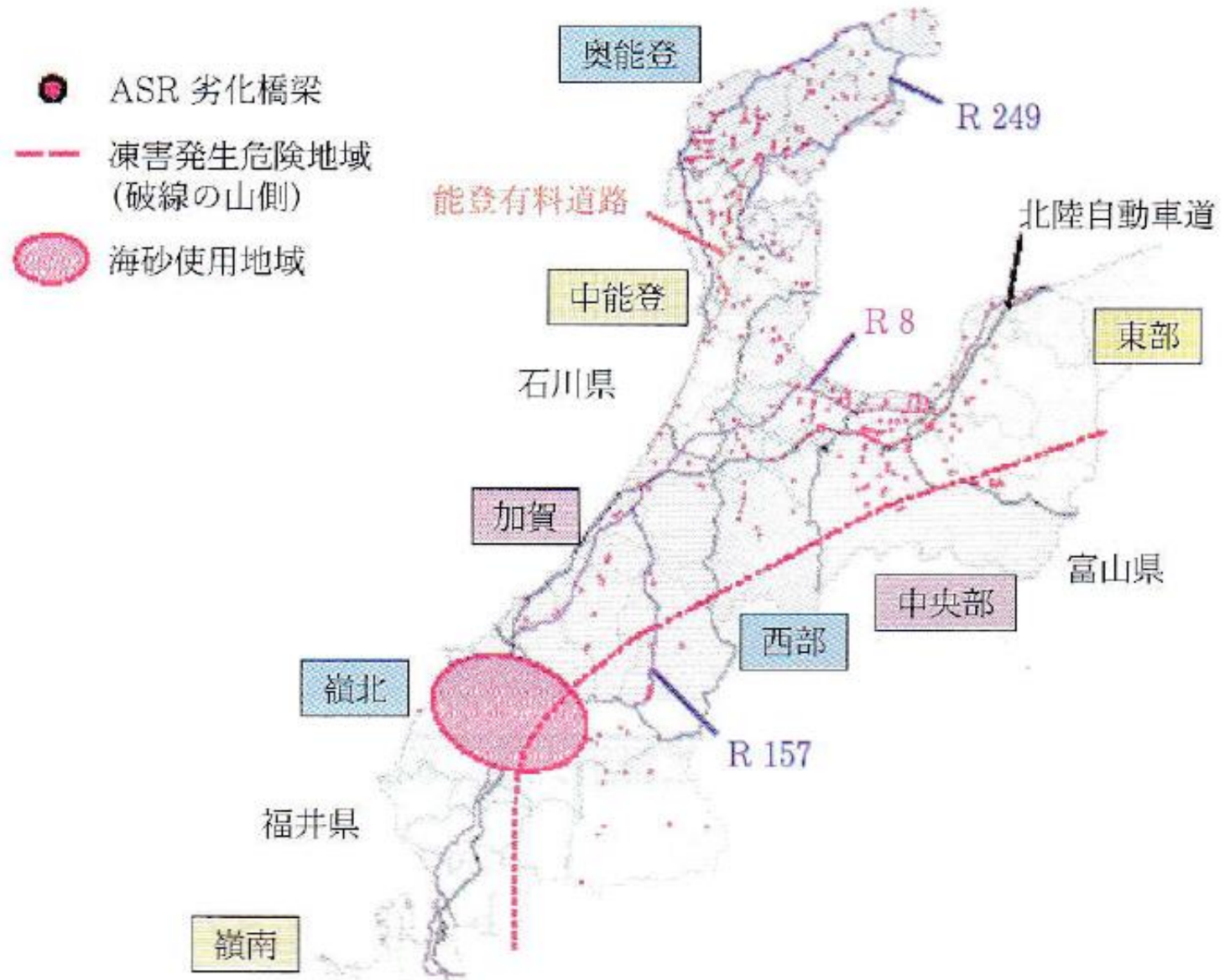
普通ポルトランドセメント	N	$\log D_r = 3.4(W/C) - 1.3$	$k_D = 0.52$
高炉セメントB種(SF含む)	BB	$\log D_r = 3.4(W/C) - 1.7$	$k_D = 0.64$
フライアッシュセメントB種	F	$\log D_r = 3.4(W/C) - 1.5$	$k_D = 0.73$

かぶりの設計値 C_d $F < BB < N$

フライアッシュの抑制効果が評価

最新のデータ, 研究成果の取込みによる

北陸地方におけるASR問題



北陸地方におけるASR問題



ASRによる劣化



鉄筋の破断
に至る劣化構造物



写真-3 フーチングの亀甲状のひび割れ

北陸地方におけるASR問題

表-1 骨材のアルカリシリカ反応性試験の結果

骨材	化学法 (JIS A 1145)				JIS A 1146		ASTM C 1260		デンマーク法	
	Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	Sc/Rc	判定	膨張量 (%)	判定	膨張量 (%)	判定	膨張量 (%)	判定
門前	289	109	2.65	無害でない	0.20	無害でない	0.55	有害	0.36	不明確
輪島	603	223	2.70	無害でない	0.07	無害	0.50	有害	0.77	有害

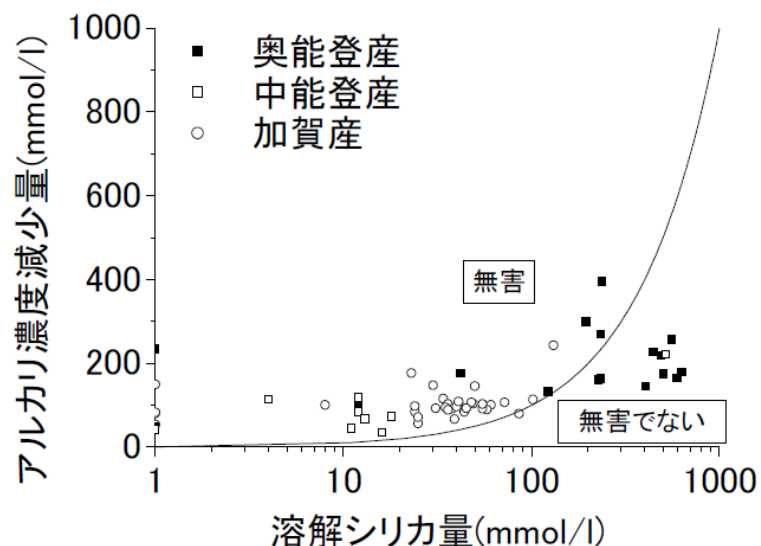


図-4 骨材のアルカリシリカ反応性(化学法)の判定結果

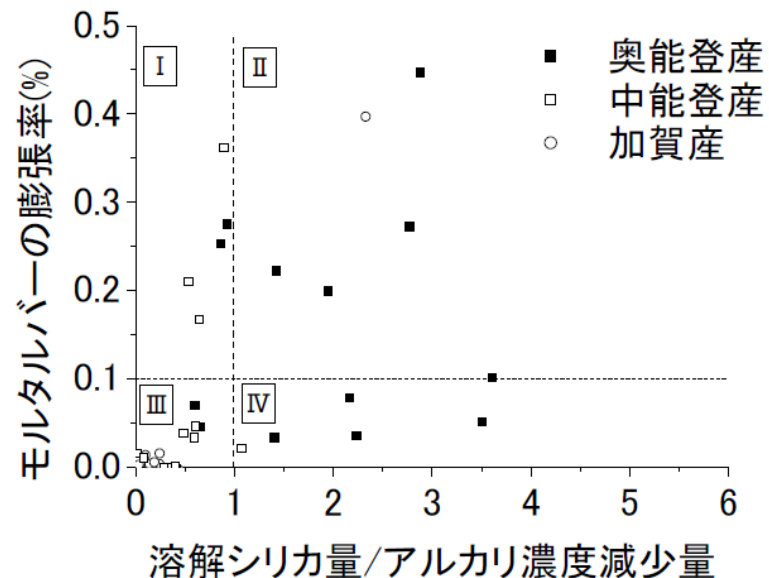


図-5 モルタルバー法の膨張率と化学法の溶解シリカ量/アルカリ濃度減少量と

北陸地方におけるASR問題

西田幾多郎記念哲学館
2002年



屋外:降雨の影響で
ASRが生じている



北陸地方におけるASR問題

北陸地方の平野部に建設された公共建築物

建設年：2005年（平成17年），海からの距離：約6km



仕切り壁



自転車駐輪場

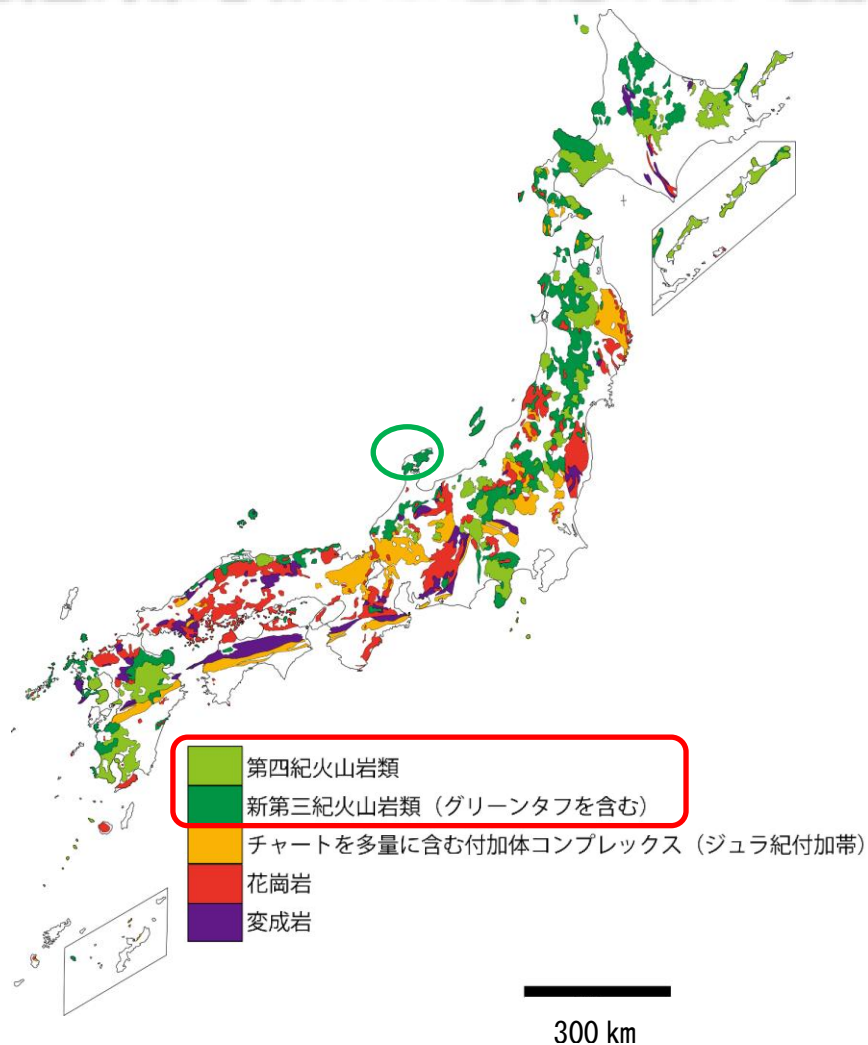


津田誠, 小山花, 野村昌弘, 鳥居和之: ASR抑制対策後に建設された公共建築物のアルカリシリカ反応の特徴と劣化原因に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.721-726, 2024

柱部: 水平ひび割れ⇒低品質なコンクリート、不十分な施工
壁部: 進行性の網の目状のひび割れ⇒ASR? (抑制対策後)

北陸地方におけるASR問題

調査対象地域のASRと関連の深い地層



広野真一, 山田一夫, 佐藤友美, 鳥居和之: わが国の代表的な反応性骨材とASRの発生に関するデータ整理, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1035-1040, 2016

抑制対策後でのASRの発生事例



実体顕微鏡観察

アルカリシリカ(骨材)反応抑制対策

- 骨材の選定による対策

骨材の反応性試験で「無害」と判定された骨材のみを使用

- 低アルカリ型セメントの使用による抑制対策

JISに規定されているNa₂O当量0.6%以下の低アルカリセメントを使用

- **アルカリシリカ(骨材)反応抑制効果を示す混合セメントによる抑制対策**
高炉セメントB種あるいはC種、またはフライアッシュセメントB種またはC種を使用

- コンクリートのアルカリ総量の規制

下式で計算されるアルカリ総量R_tを3.0kg/m³以下とする。

$$R_t = R_2O/100 \times C + 0.9 \times Cl^- + R_m$$

ここに、R₂O:セメント中のアルカリ量(%), C:セメント量(kg/m³), Cl⁻:塩化物イオン量(kg/m³)、
R_m:混和剤に含まれるアルカリ量(kg/m³)

- **塩化物量総量規制, アルカリ骨材反応抑制対策など**
⇒ コンクリート構造物の早期劣化問題解決に貢献
- **コンクリート標準示方書: 耐久設計の導入**
⇒ 耐久設計の進歩, 研究成果の取込み : 実務への普及は?
⇒ 予測式提示の功罪
 - : 予測式の**精度?**, 予測式が**独り歩き**, **絶対的な存在**⇒**技術者が盲信**
 - : 実験により把握すべきであるが, 予測式があるために実施されない。
 - : 実測できない止むを得ない場合に限り使用可であることを明示すべき⇒ 水分浸透速度係数は必要? 研究成果蓄積十分?, 十分な議論?
- **アルカリシリカ(骨材)反応に対する照査**
⇒ 塩害, 中性化による鋼材腐食と同様の照査が必要?
⇒ 骨材の選定, アルカリ総量では抑制できない? 混合セメントの標準化