

リチウムイオンを内部圧入する場合の注入圧力と注入時間に関する考察

江良 和徳^{*1}, 為石 昌宏^{*2}, 三原 孝文^{*3}, 宮川 豊章^{*4}

Optimal Specification of Pressurized Impregnation of the Lithium Nitrite

Kazunori ERA^{*1}, Masahiro TAMEISHI^{*2}, Takafumi MIHARA^{*3} and Toyoaki MIYAGAWA^{*4}

要旨：ASR による膨張を抑制する対策工として、リチウムイオンを内部圧入する工法が実用化されている。この工法は、ASR 膨張を抑制するために必要なリチウムイオン量を構造物内に注入することを目的としている。適用にあたっては、対象構造物の劣化程度に応じた適切な注入圧力、注入時間を設定してリチウムイオンを注入することが重要となる。本研究では、構造物の劣化程度と注入時間との関係を整理し、リチウムイオン内部圧入工による ASR 補修設計を行う際の設計注入時間の算定方法を提案した。

キーワード：ASR，亜硝酸リチウム，内部圧入，注入時間

1. はじめに

アルカリ骨材反応（以下、ASR と称す）により劣化したコンクリート構造物の補修工法として、リチウム系材料によりアルカリシリカゲルの膨張を抑制する工法の開発が進んでいる。リチウム系材料には、硝酸リチウム、亜硝酸リチウム、水酸化リチウムなど様々な種類があるが、国内では主に亜硝酸リチウムが使用されている。現在、亜硝酸リチウムを用いた ASR 補修工法として、塗布工法、ひび割れ注入工法および内部圧入工法の 3 種類が実用化されている¹⁾。

塗布工法は、亜硝酸リチウムをコンクリート表面に塗布、含浸させることによってリチウムイオンを骨材の周囲に供給し、ASR 膨張の抑制を図る工法である。ひび割れ注入工法は、低圧注入器を使用してひび割れから亜硝酸リチウムを注入する工法で、塗布工法と併用されることも多い。ただしこれらの工法では、ASR の抑制

に必要なリチウムイオン量を塗布または注入するのが難しく、またコンクリート内部へのイオン拡散に長時間を要するという問題が指摘されており、最近では内部圧入工法が実用化されている。

リチウムイオン内部圧入工法は、コンクリート躯体に小径の削孔を行い、そこから亜硝酸リチウムを加圧注入してコンクリート内部に浸透させる工法である。注入圧力は 0.5MPa～1.5MPa と設定される。ASR 膨張抑制効果を得るための亜硝酸リチウム必要量は対象コンクリート中のアルカリ総量に応じて算出され、 Li^+/Na^+ モル比で 1.0 となる亜硝酸リチウム量を設計注入量としている。リチウムイオン内部圧入工法による ASR 膨張抑制効果は、加圧注入の前後で採取したコンクリートコアの促進膨張試験の結果を比較することで検証することができる^{2) 3)}。しかし、ある一定の亜硝酸リチウム量を加圧注入す

*1 極東工業株式会社 大阪支店技術部技術課 主任

*2 株式会社鴻池組 大阪本店土木技術部 主任

*3 極東工業株式会社 技術本部技術部補修課

*4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授

るのに要する時間は施工対象コンクリートの強度や劣化程度などによって影響を受けるため、設計注入時間を精度よく推定することが容易ではなかった。本稿は、これまでの施工実績により得られたデータに基づき、構造物の劣化程度と注入時間との関係を整理し、リチウムイオン内部圧入工による ASR 補修設計を行う際の設計注入時間の算定方法を提案するものである。

2. 施工データの整理

2.1 対象構造物

検討の対象とした構造物は、道路構造物として供用中の擁壁、橋脚、橋台で、いずれも昭和50年代に竣工した構造物である。全ての構造物において亀甲状または水平方向のひび割れが見られ（図-1）、また一部には白色ゲルの滲出が見られるなど、ASR に特有の外観変状を呈していた。これらの構造物における施工データとして、



図-1 対象構造物の外観変状の例

コンクリート物性（圧縮強度、静弾性係数）および亜硝酸リチウムの加圧注入に要した時間をまとめたものを表-1 に示す。表中の試験加圧注入とは、各圧入孔に亜硝酸リチウムを30分間試験的に注入する工程であり、このときの所要時間から、設計注入量を注入するのに要する時間を予測している。本加圧注入とは、設計注入量を全て注入する工程であり、実際に注入を完了するために要した時間を測定している。

2.2 施工データの傾向

表-1 中の平均予測圧入完了時間および平均実完了時間は、各構造物に設置した数百箇所の圧入孔全データの平均値を示したものである。同一構造物であっても、コンクリート内部の状態は均一ではなく、ひび割れや空隙の有無などによって圧入孔毎の注入状況は大きくばらつくため、標準偏差 Sd が大きい傾向が見られる。

表-1 の結果をもとに、ASR によるコンクリートの劣化程度と亜硝酸リチウムの加圧注入に要した時間との関係を図-2 に整理した。横軸の ASR によるコンクリートの劣化程度の指標は圧縮強度および静弾性係数の2項目とし、それぞれについて整理した。縦軸の加圧注入に要した時間は、圧入孔毎に大きくばらつくことを考慮し、表-1 中の試験加圧注入により推定された圧入完了時間と本加圧注入での実完了時間の長い方について、95%の確率で注入が完了する時

表-1 リチウムイオン内部圧入工 施工データ

	コンクリート物性		試験加圧注入結果より			本加圧注入結果より			備 考	
	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	平均予測 圧入完了 時間(h)	標準 偏差 Sd (hour)	※平均値 +1.645Sd (hour)	平均 実完了 時間 (h)	標準 偏差 Sd (hour)	※平均値 +1.645Sd (hour)	1 孔あたりに 圧入する 抑制剤量 (m ³)	単位量の圧入 に要した時間 (hour/m/Litter)
擁壁 No.1	25.6	9,176	338	211	<i>685</i>	184	43	254	1.06E-02	9.20E+01
擁壁 No.2	16.2	6,400	31	25	<i>72</i>	12	11	31	1.06E-02	9.63E+00
擁壁 No.3	16.6	7,081	93	60	<i>192</i>	45	30	95	1.13E-02	2.44E+01
擁壁 No.4	18.4	5,799	38	29	<i>85</i>	28	18	58	1.13E-02	1.08E+01
擁壁 No.5	23.4	11,231	320	139	<i>549</i>	195	74	317	1.13E-02	6.97E+01
擁壁 No.6	32.2	17,563	334	113	520	420	154	<i>673</i>	1.13E-02	8.55E+01
擁壁 No.7	34.6	18,695	308	135	530	317	158	<i>578</i>	1.13E-02	7.34E+01
擁壁 No.8	28.7	19,294	279	137	<i>505</i>	210	113	397	1.13E-02	6.41E+01
橋脚(梁)	24.4	10,816	64	31	115	85	55	<i>176</i>	1.94E-02	5.04E+00
橋台(壁)	17.7	9,818	57	37	118	93	94	<i>248</i>	4.93E-03	3.99E+01

※斜字体の数値を圧入に要した時間として採用した

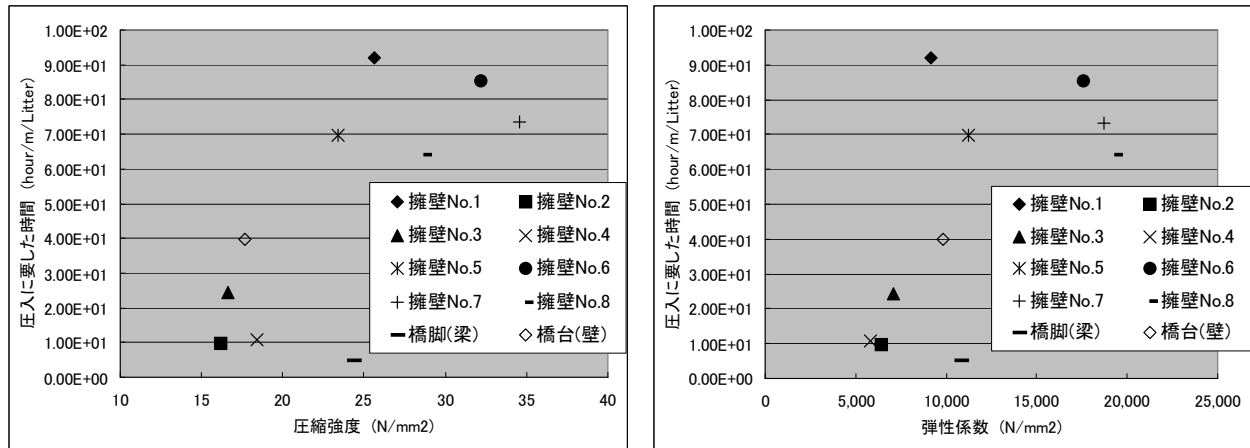


図-2 圧縮強度・弾性係数と加圧注入に要する時間の傾向
(単位圧入孔長, 1 リッターあたりの所要時間)

間(平均値+1.645Sd)を採用した。また, 部材厚やアルカリ量による圧入孔1孔あたりの亜硝酸リチウム注入量の相違を補正するために, 平均部材厚(m)と単位亜硝酸リチウム量(Litter)で除した値を単位量の注入に要した時間とした。図-2より, 亜硝酸リチウムの注に要する時間は, ASRにより劣化したコンクリートの圧縮強度あるいは静弾性係数が大きいほど長くなっており, 概ね線形性が見られる。

3. 亜硝酸リチウムの設計注入時間の算定

3.1 設計注入時間の定式化

亜硝酸リチウムの加圧注入のしやすさに関するパラメータを k_a とし, 注入に要する時間(以下, 設計注入時間と称す) t を式(1)~式(3)のように表した。

$$t = Q/q \quad (1)$$

$$q = F(k_a) \quad (2)$$

$$k_a = h(f'_c) \text{ または } h(E_c) \quad (3)$$

ここに, t : 設計注入時間, Q : 圧入孔1孔あたりに注入する亜硝酸リチウム量, q : 時間あたりの注入量, $F(k_a)$: 時間あたりの注入量を求める関数, k_a : 亜硝酸リチウムの加圧注入のしやすさに関するパラメータ, $h(f'_c)$, $h(E_c)$: k_a を求める関数, f'_c , E_c : ASRにより劣化したコンクリートの劣化過程の指標(圧縮強度, 静弾性係数)である。

3.2 加圧注入のしやすさに関するパラメータ k_a の傾向

これまでの施工における注入管理の経験から, 亜硝酸リチウムを加圧注入する場合, 注入開始後しばらくすると時間あたりの注入量はほぼ一定となる傾向を確認している。すなわち, 亜硝酸リチウムの加圧注入においては概ね定圧, 定流量の浸透となっていると推測することができる。そこで, 亜硝酸リチウムの時間あたりの注入量 q は井戸の揚水や地下水流動問題などによく用いられている定常放射状流れの式を用いて表現することを試みた。定常放射状流れのイメージを図-3に示す。式(4)は定常放射状流れの式を, 部材厚 L , 径 D の圧入孔において $P/\rho g$ なるポテンシャルを与えたときの, 亜硝酸リチウムの時間あたりの注入量 q を算定する式としたものである。

$$q = 2\pi k_a L \frac{P}{\rho g} \cdot \frac{1}{\ln(4L/D)} \quad (4)$$

ここに, q : 時間あたりの注入量 (m^3/hour), k_a : 亜硝酸リチウムの加圧注入のしやすさに関するパラメータ (m/hour), P : 設計注入圧力 (MPa, ただし上式では 10^6 倍することにより N/m^2 に単位を換算している), ρ : 亜硝酸リチウムの密度 ($=1,250$) (kg/m^3), g : 重力加速度 ($=9.8$) (m/sec^2), L : 部材厚(m), D : 圧入孔径(m)である。

ASRで劣化したコンクリート中の亜硝酸リチウムの浸透メカニズムは, 経験的にひび割れ

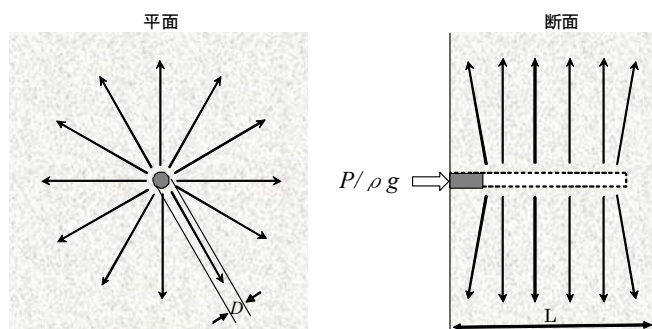


図-3 定常放射状流れのイメージ

内の浸透，コンクリートマトリックス中への圧力や濃度による拡散，骨材周辺への吸着などが複合的に関係していると推察され，式(4)で想定しているモデルとは異なる部分もあると思われるが，現状ではそれを詳細にモデル化し，考慮することは困難である．しかし，施工実績にお

いては概ね定圧力，定流量の浸透となっていることや，亜硝酸リチウムの加圧注入のしやすさに関するパラメータ k_α を施工データに基づく経験式とすることで， k_α は ASR で劣化したコンクリート中の浸透性状の不確定性を含んだ値を与え，式(4)により現時点で得られている施工データレベルで概ね実施工に即した時間あたりの圧入量 q を推定することができると考えられる．式(4)を k_α について書き直すと式(5)となる．

$$k_\alpha = \frac{q \cdot \rho g}{2\pi PL} \ln \left[\frac{4L}{D} \right] \quad (5)$$

この式(5)を用いて表-1の施工データから k_α を算定した結果を表-2 および図-4 に示す．圧縮強度または静弾性係数と負の相関が見られ，ひび割れのない健全なコンクリートの一般的な浸

表-2 亜硝酸リチウムの加圧注入のしやすさに関するパラメータ算定結果

	コンクリート物性		圧入条件					算定結果	
	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	1 孔あたりに 圧入する 抑制剤量 (m ³)	時間あたり の圧入量 q (m ³ /hour)	平均 部材厚 L (m)	圧入孔径 D (m)	注入圧力 (Mpa)	k_α (m/hour)	k_α (m/sec)
擁壁 No. 1	25.6	9,176	1.06E-02	1.55E-05	0.70	0.034	0.50	3.66E-07	1.02E-10
擁壁 No. 2	16.2	6,400	1.06E-02	1.48E-04				3.50E-06	9.72E-10
擁壁 No. 3	16.6	7,081	1.13E-02	5.87E-05				1.38E-06	3.84E-10
擁壁 No. 4	18.4	5,799	1.13E-02	1.32E-04				3.11E-06	8.63E-10
擁壁 No. 5	23.4	11,231	1.13E-02	2.05E-05				4.83E-07	1.34E-10
擁壁 No. 6	32.2	17,563	1.13E-02	1.67E-05				3.94E-07	1.09E-10
擁壁 No. 7	34.6	18,695	1.13E-02	1.95E-05				4.59E-07	1.28E-10
擁壁 No. 8	28.7	19,294	1.13E-02	2.23E-05				5.26E-07	1.46E-10
橋脚(梁)	24.4	10,816	1.94E-02	1.10E-04	1.80	0.60		1.23E-06	3.41E-10
橋台(壁)	17.7	9,818	4.93E-03	1.98E-05	0.60			5.27E-07	1.46E-10

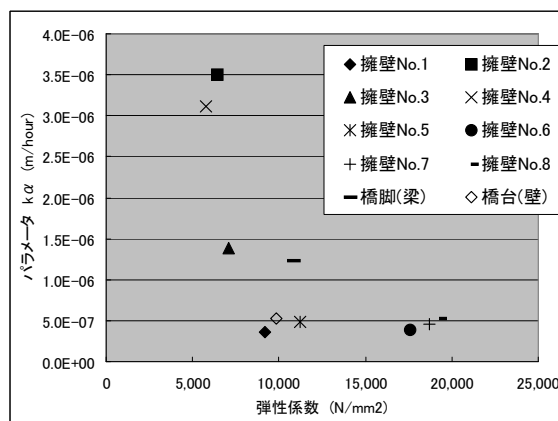
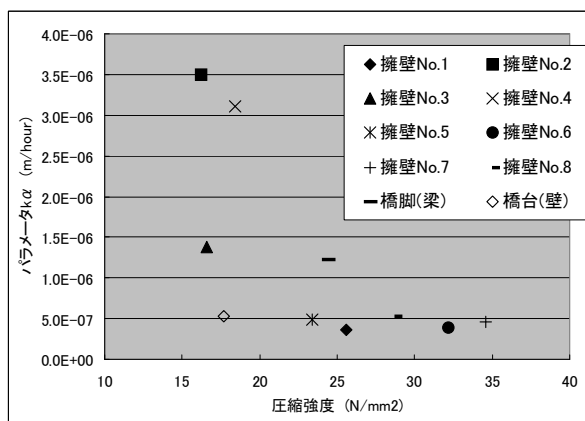


図-4 亜硝酸リチウムの加圧注入のしやすさに関するパラメータ k_α の傾向

透性 (透水係数で $1.0 \times 10^{-12} \sim 1.0 \times 10^{-14} \text{m/sec}$) に比べ、やや大きい値となっている。

3.3 加圧注入のしやすさに関するパラメータ k_α の経験式と設計注入時間の算定

図-5 は圧縮強度および静弾性係数に関する亜硝酸リチウムの圧入のしやすさに関するパラメータ k_α の回帰分析を行ったものである。得られた回帰式を抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ k_α の経験式 h (式(6), 式(7)) とした。

k_α (圧縮強度より)

$$k_\alpha = h(f'_c) = 7 \times 10^{-6} \cdot e^{-0.0892 f'_c} \quad (6)$$

k_α (静弾性係数より)

$$k_\alpha = h(E_c) = 3 \times 10^{-6} \cdot e^{-0.0001 E_c} \quad (7)$$

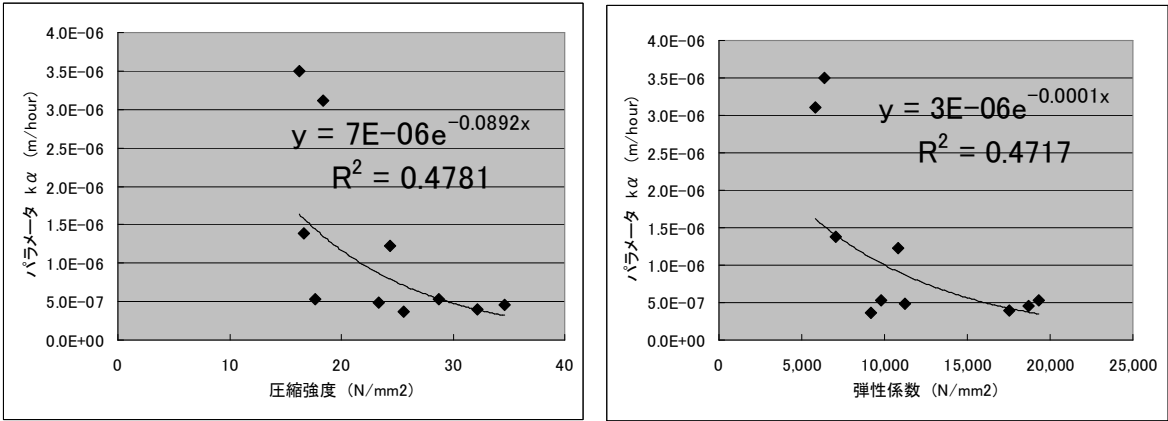


図-5 加圧注入のしやすさに関するパラメータ k_α の算定結果と回帰式

表-3 経験式による k_α および設計注入時間 t の算定結果

※	コンクリート物性		圧入条件	施工実績		経験式による k_α および t の算定結果			
	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	弾性係数 E_c (N/mm ²)	1 孔あたりに圧入する抑制剤量 Q (m ³)	平均圧入完了時間(h)	平均値 +1.645Sd (hour)	k_α (m/hour) f'_c より	圧入に要する時間 t (hour)	k_α (m/hour) E_c より	圧入に要する時間 t (hour)
擁壁 No.2	16.2	6,400	1.06E-02	31	72	1.65E-06	152	1.58E-06	158
擁壁 No.3	16.6	7,081	1.13E-02	93	192	1.59E-06	167	1.48E-06	180
橋台(壁)	17.7	9,818	4.93E-03	93	248	1.44E-06	91	1.12E-06	116
擁壁 No.4	18.4	5,799	1.13E-02	38	85	1.36E-06	196	1.68E-06	158
擁壁 No.5	23.4	11,231	1.13E-02	320	549	8.68E-07	306	9.76E-07	272
橋脚(梁)	24.4	10,816	1.94E-02	85	176	7.94E-07	273	1.02E-06	213
擁壁 No.1	25.6	9,176	1.06E-02	338	685	7.13E-07	351	1.20E-06	209
擁壁 No.8	28.7	19,294	1.13E-02	279	505	5.41E-07	490	4.36E-07	609
擁壁 No.6	32.2	17,563	1.13E-02	420	673	3.96E-07	670	5.18E-07	512
擁壁 No.7	34.6	18,695	1.13E-02	317	578	3.20E-07	830	4.63E-07	574

※強度の小さいもの順に並べ替えた

においては設計注入時間と実際の注入完了時間との差が10%未満に収まっている。残りの8ケースは設計注入時間と実際の注入完了時間との差が比較的大きく、対象構造物の状態や施工仕様によっては加圧注入に要する時間が大きくばらつく可能性を示している。このときの設計注入時間と実際の注入完了時間との差は最大で3倍程度となっている。

設計圧入時間 t を1日あたりに注入を行う時間（例えば昼間8時間施工を仮定）で除したものの、すなわち設計注入時間(hour)/8(hour/day)を設計圧入日数とした場合、昼間8時間注入するとして施工計画を立案したものの、ばらつきにより注入速度が遅い圧入孔が存在したような場合でも、注入時間を最大24時間/dayに拡大することにより、概ね設計注入日数内で注入作業を完了できることが見込まれる。よって、コンクリートの劣化状況（圧縮強度・静弾性係数）に応じて式(6)、(7)を使い分け、安全側の k_a を採用することにより、加圧注入に要する時間の予測や設計圧入日数を設定することができると考えられる。

3.4 実際の設計注入時間の算定方法

前述の算定式を用いた設計注入時間は実際には以下の手順により算定することとなる。

まず対象構造物からコアを採取し、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数を測定する。またコンクリート中のアルカリ総量を測定し、亜硝酸リチウムの設計注入量を算定する。次に対象構造物の形状に応じて圧入孔の配孔計画を行い、圧入孔間隔および圧入孔本数を決定する。圧入孔1孔あたりに注入する亜硝酸リチウム量 Q は、設計注入量/圧入孔本数により決定される。注入圧力は対象コンクリートの劣化程度に応じて概ね0.5MPa~1.5MPaの範囲内で設定する。加圧注入のしやすさに関するパラメータ k_a は、測定した圧縮強度、静弾性係数から式(6)、式(7)にて算定し、いずれか安全側の値を採用する。そのパラメータ k_a 、部材厚 L 、圧入孔径 D および設計注入圧力 P から式(4)にて時間あたりの

注入量 q を求め、式(1)より設計注入時間 t を算出する。設計圧入時間 t を1日あたりに注入を行う時間で除したものが設計圧入日数となる。

4. まとめ

本研究では、ASRにより劣化したコンクリート構造物をリチウムイオン内部圧入工により補修する場合の、亜硝酸リチウムの設計注入時間を算定する方法を検討した。検討の結果をまとめると以下ようになる。

(1)ASR によるコンクリートの劣化程度の指標を圧縮強度または静弾性係数としたとき、劣化程度と亜硝酸リチウムの加圧注入に要する時間との間には相関関係が見られる。

(2)亜硝酸リチウムの加圧注入のしやすさに関するパラメータ k_a を施工データに基づく経験式として回帰分析することにより、ASRによるコンクリートの劣化程度に応じた亜硝酸リチウムの設計注入時間算定式を提案した。

(3)設計注入時間の算定式を用いて、加圧注入に要する時間の予測や設計圧入日数を設定することができると考えられる。

(4)しかし、亜硝酸リチウムの加圧注入に要する時間は圧入孔毎に大きくばらつくことが多いため、今回の検討で用いたデータ数では十分とはいえない。今後新たに得られる施工データを蓄積し、適宜パラメータの見直しを行うことで精度の向上を図る必要があると考える。

参考文献

- 1)土木学会：コンクリートライブラリー124 アルカリ骨材対策小委員会報告書，2005
- 2)金好・内田・狩野：大型コンクリート部材におけるリチウムの ASR 抑制効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.403-408，2001
- 3)江良・岡田・三原・河原：亜硝酸リチウム高圧注入によるアルカリ骨材反応抑制効果の検証，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.5，pp.189-194，2005.10