

## 【第Ⅱ編 圧入日数の算定方法（案）】

## 1. はじめに

本工法の基本概念は「躯体内部の劣化範囲に効果的に抑制剤を加圧注入（以後圧入と称す）することにより、以後の ASR による劣化を抑制する」ものであるが、その圧入仕様における圧入孔間隔や圧入期間は開発実験で得られたデータに基づき、構造物の劣化状況等によらずほぼ一律に設定していた。しかし、設計・積算では構造物の劣化の程度に応じてこれら ASR リチウム工法の圧入仕様を決定することが求められる。そこで、これまでに試験施工で得られたデータに基づき、ASR リチウム工法における設計圧入日数の算定方法を検討した。

## 2. 試験施工データの傾向

試験施工では、抑制剤は圧入開始後しばらくすると時間あたりの圧入量はほぼ一定となることが確認されている。しかし、時間あたりの圧入量は構造物の劣化の程度により異なり、同じ構造物内でも圧入孔毎のばらつきが大きい傾向が見られた（[解説] 表-1 参照）。図 2-1 に ASR によるコンクリートの劣化の程度と抑制剤の圧入に要した時間を整理した。ただし、縦軸は構造物の寸法やアルカリ量による設計抑制剤量の相違を補正するため、平均部材厚(m)と単位抑制剤量 (Litter) で除した時間としている。また、横軸の ASR によるコンクリートの劣化の指標は圧縮強度および弾性係数とした。

図 2-1 より、抑制剤の圧入に要した時間は ASR により劣化したコンクリートの強度あるいは弾性係数が小さいほど小さく、正比例の関係が見られる。

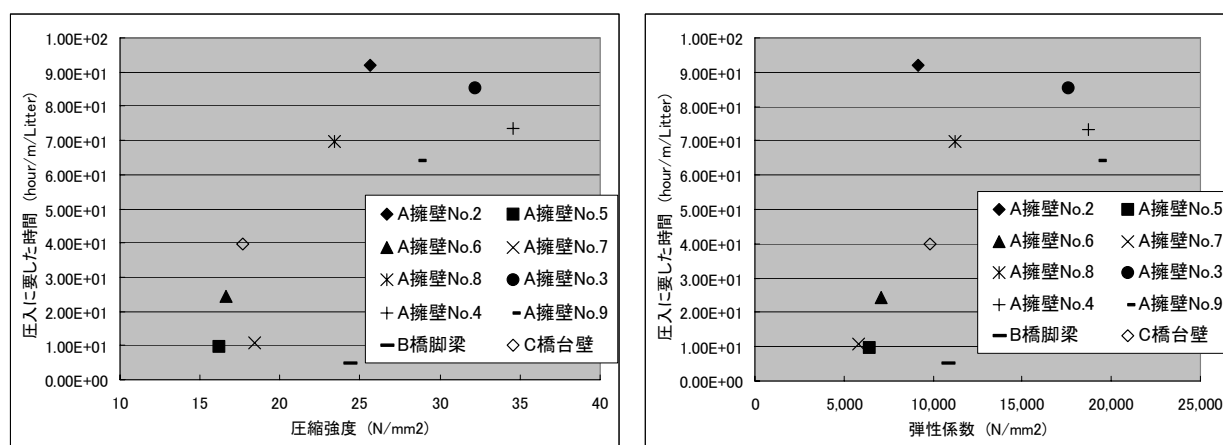


図 2-1 圧縮強度・弾性係数と圧入に要する時間の傾向

### 3. 必要圧入時間および抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ算定式

抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータを  $k_\alpha$  とし、抑制剤の圧入に要する時間  $t$  を以下のように表した。

$$t = Q/q \quad \text{式(1)}$$

$$q = F(k_\alpha) \quad \text{式(2)}$$

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

ここに、

$t$ : 圧入に要する時間,  $Q$ : 1 圧入孔あたりに圧入する抑制剤量,  $q$ : 時間あたりの圧入量,  $F(k_\alpha)$ : 時間あたりの圧入量を求める関数,  $k_\alpha$ : 抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ,  $h(f'_c)$ ,  $h(E_c)$ :  $k_\alpha$  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程度の指標 (圧縮強度、弾性係数)

時間あたりの圧入量  $q$  を求める関数  $F$  については実構造物への圧入を想定した場合、抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_\alpha$  のみでだけではなく、注入圧力や圧入孔径、部材厚さも影響していると考えられる。これらを考慮した  $q$  の算定式として式(4)を仮定した。

$$q = f(k_\alpha, L, P, D) = 2\pi\alpha L \frac{P}{\rho g} \cdot \frac{1}{\ln(4L/D)} \quad (\text{m}^3/\text{hour}) \quad \text{式(4)}$$

ここに、

$f(k_\alpha, L, P, D)$ : 時間あたりの圧入量を求める関数,  $P$ : 設計注入圧力 ( $\text{MPa} = 10^6 \text{N/m}^2$ ),  
 $\rho$ : 抑制剤の密度 ( $=1,250$ ) ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$ : 重力加速度 ( $=9.8$ ) ( $\text{m/sec}^2$ )  $L$ : 部材厚(m),  
 $D$ : 圧入孔径(m)

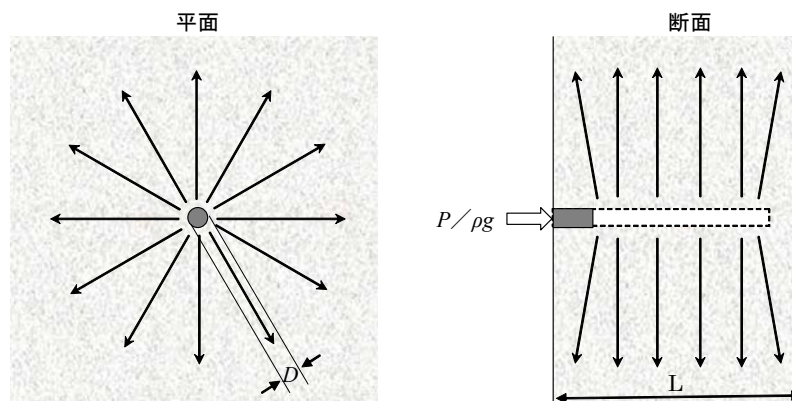


図 3-1 定常放射状流れのイメージ

式(4)は井戸の揚水、注水等の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、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抑制剤の時間あたりの圧入量算定式としたものである。図 3-1 にそのイメージ

を示す。ASR で劣化したコンクリート中の抑制剤の浸透メカニズムは上式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、試験施工においては概ね定圧力、定流量（定常）の圧入となっていることや、抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_a$  を試験施工データに基づく経験式とすることで、 $k_a$  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)により現状得られている試験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。このため試験施工データを回帰分析することにより  $k_a$  を求める関数  $h$  を求めた。

式(4)を  $k_a$  について書き直すと式(5)となる。

$$k_a = \frac{q \cdot \rho g}{2\pi PL} \ln\left(\frac{4L}{D}\right) \quad (\text{m/hour}) \quad \text{式(5)}$$

このとき、ASR により劣化したコンクリートの劣化の指標を圧縮強度あるいは弾性係数として、回帰分析により試験施工データから  $k_a$  を求める関数  $h$ （経験式）を求めたところ次式が得られた（[解説] 参照）。

$$k_a = h(f'_c) = 7 \times 10^{-6} \cdot e^{-0.0892 f'_c} \quad \text{式(6)},$$

$$\text{または } k_a = h(E_c) = 3 \times 10^{-6} \cdot e^{-0.0001 E_c} \quad \text{式(7)}$$

#### 4. 設計圧入日数の算定方法

前述の算定式を用いた設計圧入日数算定方法を示す。

計算手順としては以下のようなになる（図 4-1）。

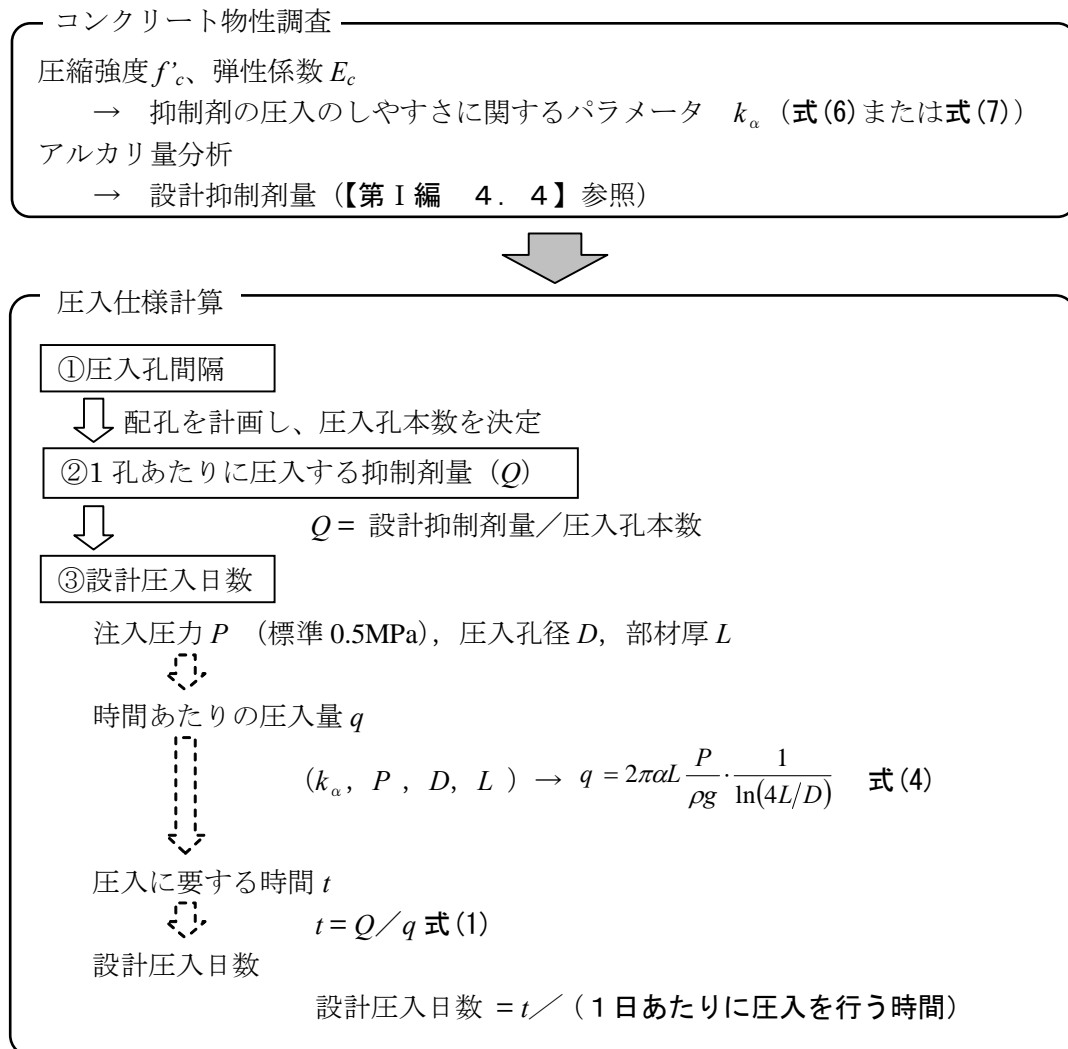


図 4-1 設計圧入日数算定手順

まず、設計計算にはコンクリート物性として、圧縮強度、または弾性係数とコンクリート中のアルカリ量が必要となる。圧縮強度、弾性係数については抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_a$  算定に用いる（式(6)または式(7)）。また、コンクリート中のアルカリ量分析結果により、設計抑制剤量を算定する。設計抑制剤量はコンクリート中の単位体積あたりのアルカリ量に対してモル比 1.0 となる抑制剤量にコンクリート体積を乗じることで求める（【第 I 編 4. 4】参照）。

圧入仕様の決定は以下の手順で行う。

- ①配孔計画により圧入孔間隔を設定することで対象構造物の圧入孔の本数が決定される。
- ②圧入孔 1 孔あたりに圧入する抑制剤量  $Q$  を設計抑制剤量／圧入孔本数により決定する。
- ③注入圧力（標準 0.5MPa）を設定し、抑制剤の圧入しやすさに関するパラメータ  $k_a$ 、および、圧入孔径  $D$ 、部材厚  $L$  より式(4)から時間あたりの圧入量  $q$  が、また、 $Q/q$ （式(1)）より圧入に要する時間  $t$  が求まる。このとき、 $t$  を 1 日あたりに圧入を行う時間（例えば昼間施工ならば 8 時間／日など）で除すことにより設計圧入日数を求めることができる。

## [解説] 抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ $k_{\alpha}$ の設定方法

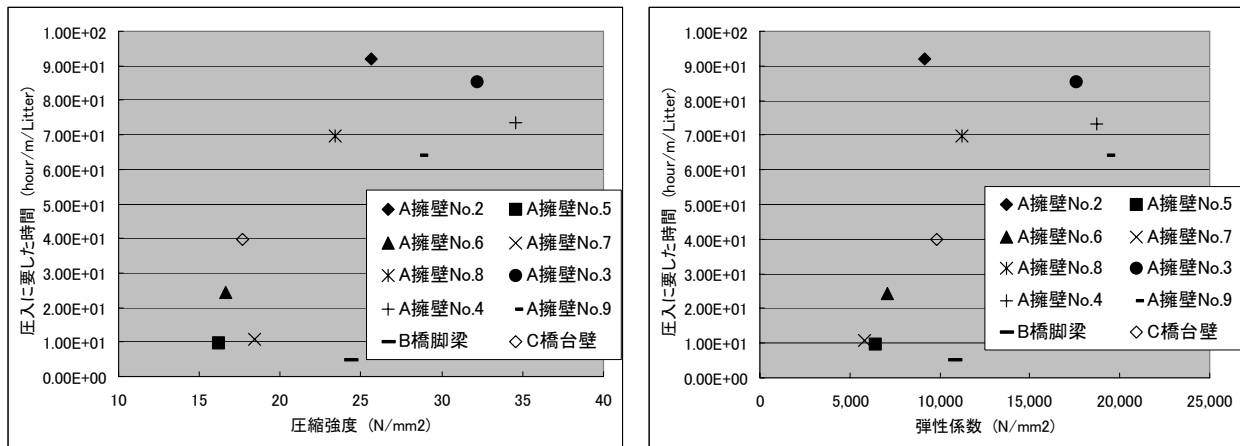
### 1. 試験施工データの整理

試験施工で得られたデータを解.表-1にまとめた。試験加圧注入あるいは本加圧注入において、ASRで劣化したコンクリートに削孔した圧入孔よりASR抑制剤を加圧注入した場合、圧入開始後しばらくすると時間あたりの圧入量はほぼ一定となる。すなわち、ASRリチウム工法においては概ね定圧、定流量（定常）の圧入となっていると見なせる。このため、試験施工においては時間あたり一定の圧入量に対して所定量の圧入に要する時間を予測し、圧入の管理を行っている。しかし、時間あたりの圧入量は構造物の劣化の程度により異なり、同じ構造物においても圧入孔毎のばらつきが大きいと見なせる。このため、標準偏差Sdが大きい傾向が見られた（解.表-1）。解.図-1にASRによるコンクリートの劣化の程度と抑制剤の圧入に要した時間を整理した。ただし、縦軸の圧入に要した時間は解.表-1中の試験加圧注入により推定された圧入の完了時間、あるいは本加圧注入での実完了時間の長い方について、95%の確率で圧入が完了する時間（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孔あたりの抑制剤量の相違を補正するため、平均部材厚(m)と単位抑制剤量(Litter)で除した値を単位量の圧入に要した時間とした。また、横軸のASRによるコンクリートの劣化の指標は圧縮強度および弾性係数とした。解.図-1より、ASR抑制剤の圧入に要する時間はASRにより劣化したコンクリートの圧縮強度あるいは弾性係数が小さいほど小さく、正比例の関係が見られる。

解.表-1 試験施工データの傾向（圧縮強度・弾性係数と圧入に要した時間）

	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 <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	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 <sup>3</sup> )	単位量の圧入 に要した時間 (hour/m/Litter)
A擁壁 No.2	25.6	9,176	338	211	685	184	43	254	1.06E-02	9.20E+01
A擁壁 No.5	16.2	6,400	31	25	72	12	11	31	1.06E-02	9.63E+00
A擁壁 No.6	16.6	7,081	93	60	192	45	30	95	1.13E-02	2.44E+01
A擁壁 No.7	18.4	5,799	38	29	85	28	18	58	1.13E-02	1.08E+01
A擁壁 No.8	23.4	11,231	320	139	549	195	74	317	1.13E-02	6.97E+01
A擁壁 No.3	32.2	17,563	334	113	520	420	154	673	1.13E-02	8.55E+01
A擁壁 No.4	34.6	18,695	308	135	530	317	158	578	1.13E-02	7.34E+01
A擁壁 No.9	28.7	19,294	279	137	505	210	113	397	1.13E-02	6.41E+01
B橋脚梁	24.4	10,816	64	31	115	85	55	176	1.94E-02	5.04E+00
C橋台壁	17.7	9,818	57	37	118	93	94	248	4.93E-03	3.99E+01

※太文字の値を圧入に要した時間として採用した。



解. 図-1 圧縮強度・弾性係数と圧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)

2. 抑制剤圧入に要する時間の定式化と抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_\alpha$  の傾向

抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータを  $k_\alpha$  とすると抑制剤の圧入に要する時間  $t$  は前述したように以下のように表すことができる。

$$t = Q/q \quad \text{式(1)} \quad (\text{再掲})$$

$$q = F(k_\alpha) \quad \text{式(2)} \quad (\text{再掲})$$

$$k_\alpha = h(f'_c) \text{ または } h(E_c) \quad \text{式(3)} \quad (\text{再掲})$$

ここに、

$t$ : 圧入に要する時間,  $Q$ : 1 圧入孔あたりに圧入する抑制剤量,  $q$ : 時間あたりの圧入量,  $F(k_\alpha)$ : 時間あたりの圧入量を求める関数,  $k_\alpha$ : 抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ,  $h(f'_c)$ ,  $h(E_c)$ :  $k_\alpha$  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の指標 (圧縮強度、弾性係数)

時間あたりの圧入量  $q$  を求める関数  $F$  については抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_\alpha$  のみでだけではなく、注入圧力や圧入孔径、部材厚さも影響も考慮した  $q$  の算定式として式(4)を仮定した。

$$q = f(k_\alpha, L, P, D) = 2\pi\alpha L \frac{P}{\rho g} \cdot \frac{1}{\ln(4L/D)} \quad (\text{m}^3/\text{hour}) \quad \text{式(4)} \quad (\text{再掲})$$

ここに、

$f$ : 時間あたりの圧入量を求める関数,  $P$ : 設計注入圧力 ( $\text{MPa}=10^6\text{N/m}^2$ ),  $\rho$ : 抑制剤の密度 ( $=1,200$ ) ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$ : 重力加速度 ( $=9.8$ ) ( $\text{m/sec}^2$ )  $L$ : 部材厚 (m),  $D$ : 圧入孔径(m)

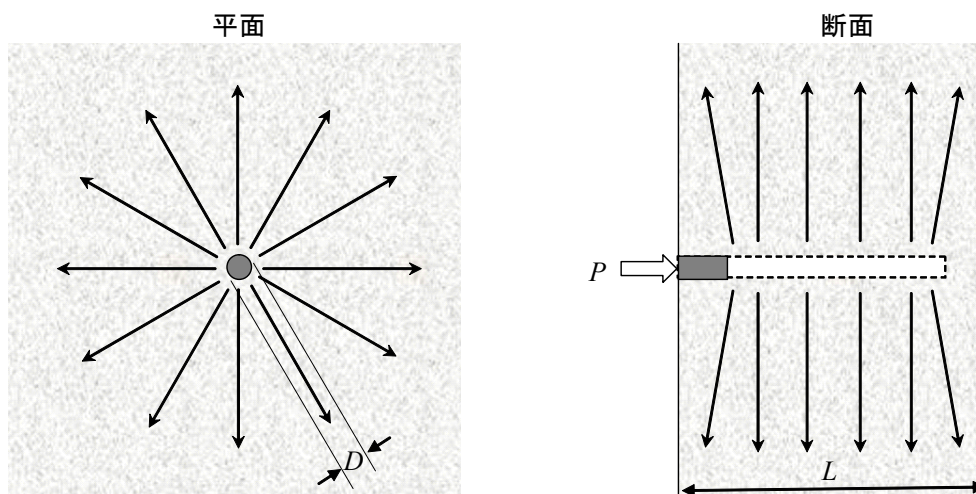


式(4)は井戸の揚水、注水等の地下水流動問題などによく用いられている定常放射状流れの式を、部材厚  $L$ 、径  $D$  の圧入孔において  $P/\rho g$  なるポテンシャルを与えたときの抑制剤の時間あたりの圧入量算定式としたものである。解. 図-2 にそのイメージを示す。ASR で劣化したコンクリート中の抑制剤の浸透メカニズムは経験的にひび割れ内の浸透（流れ）、コンクリートマトリックス中への圧力や濃度による拡散、骨材周辺への吸着などが複合的に関係していると推察され、式(4)で想定しているモデルとは異なる部分もあると思われるが、現状ではそれを詳細にモデル化し、考慮することは困難である。しかし、試験施工においては概ね定圧力、定流量（定常）の圧入となっていることや、抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_a$  を試験施工データに基づく経験式とすることで、 $k_a$  は ASR で劣化したコンクリート中における抑制剤の浸透性状の不確定性を含んだ値を与え、式(4)により、現状得られている試験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  $q$  を推定できると考えられる。このため試験施工データから  $k_a$  を求め、その傾向を調べた。

ただし、

$$k_a = \frac{q \cdot \rho g}{2\pi PL} \ln\left(\frac{4L}{D}\right) \quad \text{式(5)} \quad (\text{再掲})$$

$$\therefore q = f(k_a, L, P, D) = 2\pi k_a L \frac{P}{\rho g} \cdot \frac{1}{\ln(4L/D)} \quad \text{式(4)より}$$

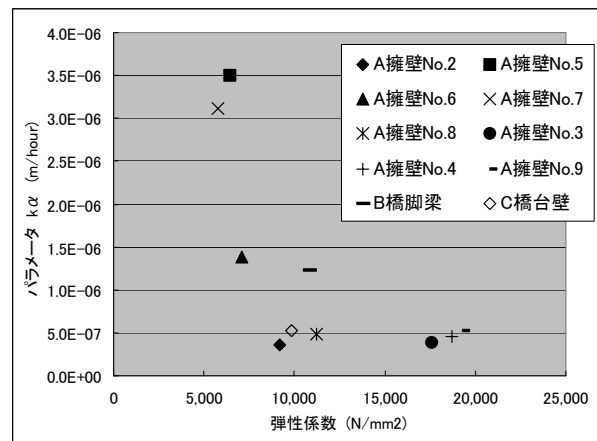
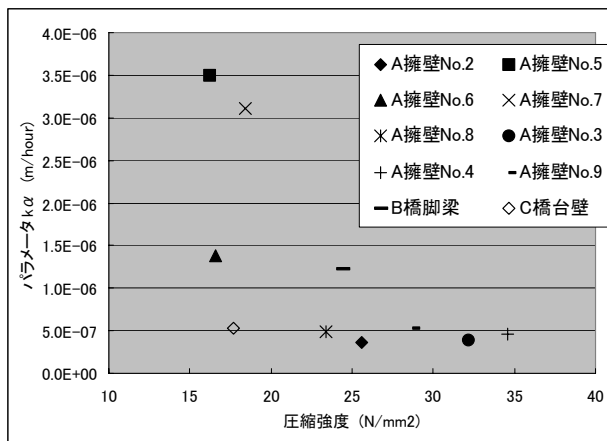


解. 図-2 定常放射状流れのイメージ

解. 表-2 および解. 図-3 に抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_\alpha$  の算定結果を示す。圧縮強度または弾性係数と負の相関が見られ、一般の内部ひび割れのないコンクリートの浸透性 ( $1.0 \times 10^{-12} \sim 1.0 \times 10^{-14}$  m/sec) に比べやや大きい値となっている。

解. 表-2 抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $\alpha$  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 <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	1 孔あたりに圧入する抑制剤量(m <sup>3</sup> )	時間あたりの圧入量 q (m <sup>3</sup> /hour)	平均部材厚 L (m)	圧入孔径 D (m)	注入圧力 (Mpa)	$k_\alpha$ (m/hour)	$k_\alpha$ (m/sec)
A 擁壁 No. 2	25.6	9,176	1.06E-02	1.55E-05	0.70	0.034	0.50	3.66E-07	1.02E-10
A 擁壁 No. 5	16.2	6,400	1.06E-02	1.48E-04				3.50E-06	9.72E-10
A 擁壁 No. 6	16.6	7,081	1.13E-02	5.87E-05				1.38E-06	3.84E-10
A 擁壁 No. 7	18.4	5,799	1.13E-02	1.32E-04				3.11E-06	8.63E-10
A 擁壁 No. 8	23.4	11,231	1.13E-02	2.05E-05				4.83E-07	1.34E-10
A 擁壁 No. 3	32.2	17,563	1.13E-02	1.67E-05				3.94E-07	1.09E-10
A 擁壁 No. 4	34.6	18,695	1.13E-02	1.95E-05				4.59E-07	1.28E-10
A 擁壁 No. 9	28.7	19,294	1.13E-02	2.23E-05				5.26E-07	1.46E-10
B 橋脚梁	24.4	10,816	1.94E-02	1.10E-04				1.80	1.23E-06
C 橋台壁	17.7	9,818	4.93E-03	1.98E-05	0.60	5.27E-07	1.46E-10		



解. 図-3 抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_\alpha$  の傾向

### 3. 抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ $k_\alpha$ の経験式

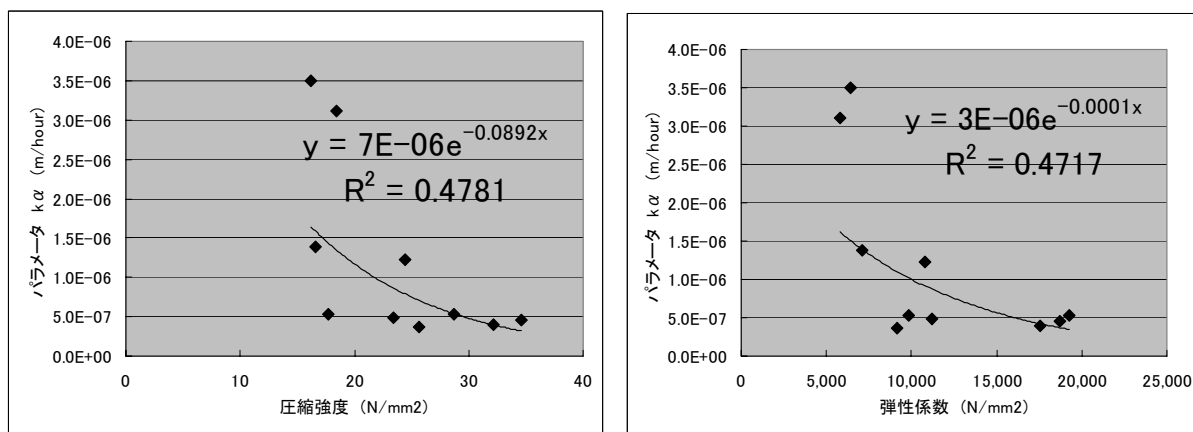
解. 図-4 は解. 図-3 について、圧縮強度あるいは弾性係数に関する抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_\alpha$  の回帰分析を行ったものである。得られた回帰式を抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_\alpha$  の経験式  $h$  (式 (6), 式 (7)) とした。

$k_\alpha$  (圧縮強度より)

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

$k_\alpha$  (弾性係数より)

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



解. 図-4  $k_\alpha$  算定結果と回帰式

また、解. 表-3 は試験施工における対象構造物のコンクリートの圧縮強度あるいは弾性係数に抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_\alpha$  の経験式  $h$  を適用し、圧入に要する時間  $t$  を求めたものである。

ただし、圧入に要する時間  $t$  (hour) は

$$t = Q/q \quad (\text{hour}) \quad \text{式 (1)} \quad (\text{再掲})$$

$$q = 2\pi k_\alpha L \frac{P}{\rho g} \cdot \frac{1}{\ln(4L/D)} \quad (\text{m}^3/\text{hour}) \quad \text{式 (4)} \quad (\text{再掲})$$

解.表-3 経験式による  $k_a$  および圧入に要する時間の算定結果

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

解.表-3 より、西 No.2 の抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_a$  を弾性係数により求めた場合 (表中太字) を除き、圧入要する時間の算定結果はいずれのケースも施工実績の平均+1.645Sd (95%確率) 以内あるいはその 3 倍以内となっている。これより、圧縮強度あるいは弾性係数に基づき経験式により推定した抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ  $k_a$  を用いて求めた圧入に要する時間を 1 日あたりに圧入を行う時間 (例えば昼間 8 時間施工を仮定) で除したものの、すなわち必要圧入時間 (hour) / 8(hour/day) を設計圧入日数とすることで昼間 8 時間の圧入で完了、あるいはばらつきにより圧入速度が遅い圧入孔が存在した場合でも圧入時間を最大 24 時間 / day に拡大することにより、概ね設計圧入日数内で圧入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 (強度・弾性係数) に応じて式 (6) , 式 (7) を使い分け、安全側の  $k_a$  を採用することにより、これまでの施工実績に基づき適切な圧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。

ただし、本手法を試験施工で得られている圧縮強度・弾性係数 (解.表-1) の範囲以外に適用する場合は外挿近似となることに注意が必要である。また、圧力については注入圧力を高くして時間あたりの圧入量の増加を期待しても、乱流の影響により圧力の増加ほど圧入量が大きくならない可能性がある。試験施工は注入圧力 0.5MPa で圧入を行っており、例えば注入圧力を 1.0MPa とした場合における時間あたりの圧入

量の線形性は確認されていない。ゆえに**式(4)**は圧力について線形であるが、 $k_a$ を求める経験式誘導は注入圧力 0.5MPa のデータのみで行われているため、これ以外の注入圧力において本手法を用いる場合も外挿近似となることに注意が必要である。

しかし、現在までに得られているデータではデータ数が十分とは言い難いため、今後蓄積されるデータに基づき、適宜パラメータの見直しを行うことで精度の向上が期待できると考えられる。