第Ⅴ部門　　リチウムイオン内部圧入工における設計注入時間の算出に関する研究

京都大学　学生員○阪口　晃祐　　極東工業㈱　正会員　江良　和徳
京都大学　正会員　山本　貴士　　正会員　服部　篤史　　フェロー　宮川　豊章

１．はじめに

近年、コンクリート構造物中の鉄筋がアルカリシリカ反応（以下、ASR と称す）によるコンクリートの膨張によって破断するという現象が報告されており、ASR 対策が急務となっている。ASR 対策の一つとして、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するリチウムイオン内部圧入工が実用されている [1)]。ASR による劣化が顕在化したコンクリートに対するリチウムイオン内部圧入に要する時間の推定に関して、施工対象コンクリートの強度低下や弾性係数の低下に応じて算定する経験式が提案されている [2)]。しかし、ASR による劣化が顕在化していないコンクリートに対し、予防保全的に本工法を適用する場合の注入に要する時間に関する研究はほとんどなされていない。本稿は、まだひび割れのないコンクリートに対してリチウムイオン内部圧入工を適用する場合の注入に要する時間について検討を行ったものである。

２．実験概要

供試体はφ100×H200mm のコンクリート円柱とし、骨材に反応性骨材として安山岩（北海道産）、チャート（岐阜県産）の 2 種類を用いた。コンクリートの配合は ASR による膨張が最大となる骨材比率のペシマム値を用い、添加アルカリとして NaCl を等価 Na_2O 量で 8.0 kg/m^3 となるよう加えた。供試体数は安山岩、チャートそれぞれ 5 体ずつ用意した。打設、水中養生を行ったのちに 40℃、RH95%の促進養生環境に移し、促進養生 1 ヵ月後にφ10×L150mm の穴を削孔し、亜硝酸リチウム 40%水溶液の加圧注入を行った。亜硝酸リチウムの設計注入量は、コンクリートのアルカリ量より Li/Na モル比 1.0 となる量と設定した。注入圧力は 1.0MPa とした。

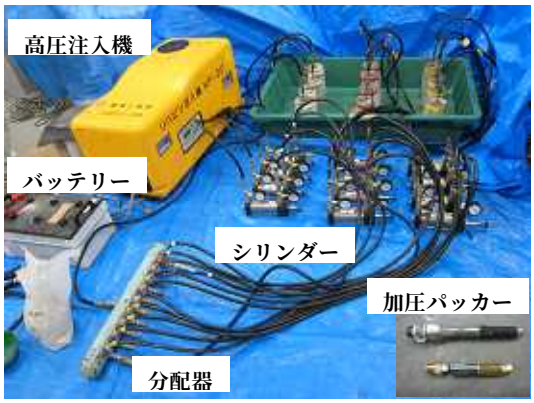

写真１　圧入装置一式

写真 1 に圧入装置一式を示す。圧入を行う直前に供試体を炉乾燥させ、飽和状態からの質量変化を計測することでそれぞれの供試体の質量変化率とした。亜硝酸リチウムの加圧注入に関して、各供試体における注入開始から終了までの時間と、注入された亜硝酸リチウム量を計測した。

３．実験結果および考察

安山岩およびチャートを用いた供試体は促進養生 1 ヵ月後において、膨張率は-100μ程度で、外観にひび割れは顕在化していなかった。その供試体各 5 体に対し、亜硝酸リチウムを 504 時間連続で加圧注入した。このときの各供試体に注入された亜硝酸リチウム量と、あらかじめ測定しておいた各供試体の質量変化率を図 1 に示す。図中の A-1～5 は安山岩を用いた供試体、C-1～5 はチャートを用いた供試体であり、各 5 体の配合は同一である。図 1 が示すとおり、同一配合のコンクリートに一定の時間だけ亜硝酸リチウムを注入したにも関わらず、注入量に大きな差が生じており、質量変化率の値が大きいほど（より乾燥しているほど）圧入に要する時間が短い（圧入しやすい）という傾向が見られる。本実験で得られた注入時間を、供試体高さ（m）と亜硝酸リチウム量（ℓ）で除して各供試体の亜硝酸リチウム単位量あたり

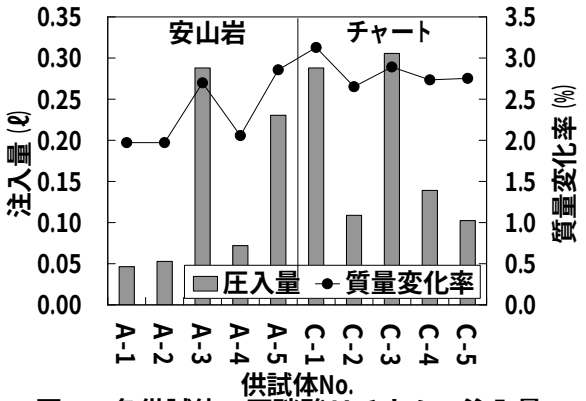

図１　各供試体の亜硝酸リチウムの注入量および質量変化率

Kohsuke SAKAGUCHI, Kazunori ERA, Takashi YAMAMOTO, Atsushi HATTORI and Toyoaki MIYAGAWA

に要する注入時間とし、単位量あたりの注入に要する時間と質量変化率との関係を図 2 に示す。注入に要する時間（注入しやすさ）と質量変化率との間には負の相関が見られる。

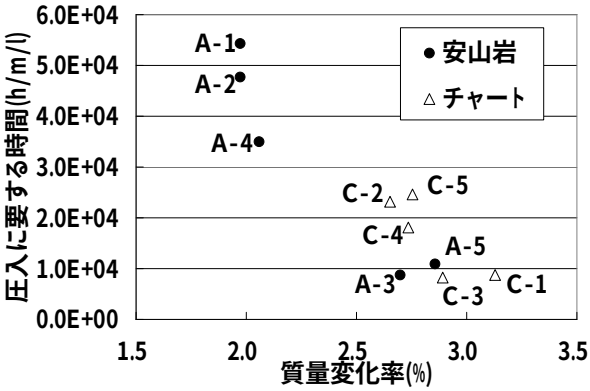

図 2　単位量あたりに要する圧入時間と質量変化率

亜硝酸リチウムの加圧注入における過去の施工管理の経験から、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。つまり、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できる。そこで、定常放射状流れの式を用いて、設計注入時間の推定式を提案することとした。ただし、ひび割れのないコンクリートに亜硝酸リチウムを加圧注入する場合、注入のしやすさはコンクリートの含水率に影響を受けることが分かった。そこで、注入時間の推定式はコンクリートの含水状態（質量変化率を指標とする）に応じた式とすることとした。

設計注入時間 t は以下の式(1)および(2)より求める。式(2)は、定常放射状流れの式より亜硝酸リチウムの時間あたりの注入量 q を算出する式である。

$$t = Q/q \tag{1}$$

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

ここに、t:設計注入時間（hour）、Q:圧入孔 1 孔あたりに注入する亜硝酸リチウム量（ℓ）、q:時間あたりの注入量（ℓ/hour）、k_{α}: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、P:設計注入圧力（N/m^2）、ρ:亜硝酸リチウムの密度（=1.250 kg/m^3）、g:重力加速度（=9.8m/sec^2）、L:供試体高さ（m）、D:圧入孔径（m）とする。

式(2)を k_{α} について書き直すと、式(3)になる。

$$k_{\alpha} = \frac{q \cdot \rho g}{2\pi P L} \ln\left(\frac{4L}{D}\right) \tag{3}$$

この式(3)を用いて実験データより k_{α} を算出した結果を図 3 に示す。実線および点線の曲線は、安山岩およびチャートの供試体における k_{α} の回帰分析を行った物である。回帰式は以下の式(4)および式(5)となり、k_{α} の経験式とした。

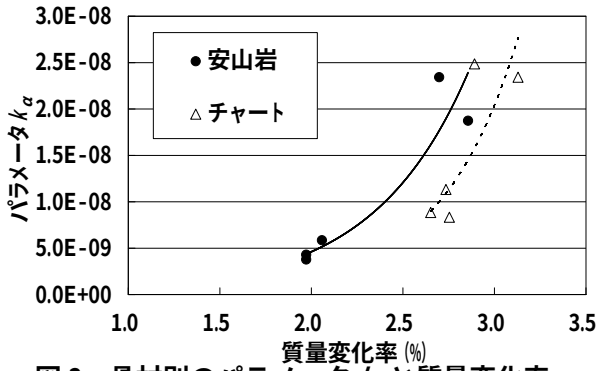

図 3　骨材別のパラメータ k_{α} と質量変化率および回帰分析による近似関数

○安山岩の場合　　$k_{\alpha} = 1\times10^{-10} \cdot e^{1.9228\Delta\omega}$ (4)

○チャートの場合　　$k_{\alpha} = 2\times10^{-11} \cdot e^{2.3673\Delta\omega}$ (5)

ここに、$\Delta\omega$:質量変化率（%）とする。

以上より、ひび割れのないコンクリートに亜硝酸リチウム内部圧入工を適用する場合の注入に要する時間は式(1)、(2)、(4)、(5)を用いて算出することができる。実際の施工では、対象構造物より採取したコンクリートコアの吸水率から質量変化率を求め、その質量変化率に応じた k_{α} を式(4)および(5)にて算出する。得られた k_{α} を用いて式(2)を計算することで圧入に要する時間を推定することができる。

4．今後の課題

本研究で検討したのは供試体 10 体におけるデータのみであった。回帰分析を行うにはサンプル数が少ないため、今後はサンプル数を増やし、k_{α} の経験式の精度を上げていく必要がある。

参考文献

1) 金好昭彦、内田博之、狩野裕之：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

2) 江良和徳、為石昌宏、三原孝文、宮川豊章：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、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、第 7 巻、pp.161-166、2007.11