

(14) 静的破砕剤による岩質材料の破砕について

名古屋大学工学部 正 会 員 ○新 田 宏 基
 名古屋大学工学部 学生会員 青 柳 尚 志
 名古屋大学工学部 正 会 員 市 川 康 明
 名古屋大学工学部 正 会 員 川 本 脩 万

1. はじめに

市街地周辺や既設構造物に隣接する工事における岩盤の掘削や構造物の解体、あるいはトンネル（空洞）内の二次的な掘削や転石の処理のように本工事に並行して行われる工事では、騒音、振動や安全性を考慮して爆薬や大型機械を用いない工法、すなわち機械的衝撃による工法、研削による工法や静的破砕剤のように膨張圧力による工法などが採られている。これらの工法中、数年前に初めて製品化された静的破砕剤はその取り扱いが簡単であることから内外に注目されたが、経済性に大きな問題があり、合理的な破砕設計や他工法との併用などによる改善が要求されている。そのため、静的破砕剤に関する研究報告^{1), 2), 3)}では充填孔の孔形や孔配置、鉄筋の有無などによる岩質材料の力学的挙動、破壊形状や破砕条件に関する例は多く見られるが、膨張特性については十分表現されておらず、数値解析においても導入された例はない。

静的破砕剤による膨張圧発現は、水との水和反応によって生じる体積膨張に対して、岩盤などの被破砕体が変形・抵抗することによって発生する応力である。被破砕体の物性が異なれば膨張圧発現は明らかに一様ではなくなり、また水和反応は水比や温度などの影響を受けることが考えられるので体積膨張の速度も変化する。このためにその膨張特性は複雑となり、膨張圧によって表現することは困難と思われる。

本研究では、このように材料として特異な性質を有する静的破砕剤の膨張特性を体積膨張率で表現し、岩質材料の破砕などに関する数値解析への適用について検討した。

2. 膨張圧発現を支配する要因

静的破砕剤の化学成分は表-1に示

表-1 静的破砕剤の化学成分（重量：%）

示すようにCaOを主成分としCaO-SiO ₂ -CaO-CaSO ₄ 系クリンカの粉末である。水と練り混ぜる	lg. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total
	1.2	8.5	2.4	1.1	81.3	0.7	4.5	99.7

と3CaO・SiO₂や間隙質鉱物の水和反応が進行するにつれて徐々にCaOの水和反応が開始され、Ca(OH)₂の生成・結晶成長によって体積膨張が生じるように化学的、物理的に調製されている⁴⁾。このようなメカニズムによって、被破砕体中で膨張圧として作用する材料であるので、破砕剤スラリーの温度や水比、被破砕体の種類や内在する節理あるいはその温度などによって体積膨張および膨張圧は異なってくる。

一般に静的破砕剤の膨張特性はその膨張圧によって表現されている。渡辺ら¹⁾は静的破砕剤の膨張圧を支配する要因として、①水比、②温度、③拘束度を挙げ、鋼管を用いて実験を行い、その結果を報告している。図-1図-2はそれぞれ水比、温度（室内）に対する膨張圧の経時変化である。水比は小さい程大きな膨張圧を示しているが、水比20%では静的破砕剤スラリーの流動性が乏しく、また35%以上では材料分離が生じている。ここでは最適な水比は25%であるとしている。室内温度については高い程大きな膨張圧を示しており、水和反応は温度が高い程速くなることから、静的破砕剤スラリーの温度も高ければ水和反応を促進することがわかる。図-3は拘束度に対する各時刻での膨張圧を示している。ここでの拘束度Rとは静的破砕剤の体積膨張に対して、測定に用いた鋼管が抵抗する度合いであり、厚肉円筒理論により次式で示される。

$$R = E(r_2^2 - r_1^2) / r_1 \{ r_2^2 + r_1^2 - \nu(2r_1^2 - r_2^2) \} \quad (1)$$

被破砕体の形状が鋼管のような円筒形であれば拘束度Rによる比較は有効であるが、一般的ではない。しかし、拘束の度合いが膨張圧発現に関与しているのは明らかである。膨張圧は前述のように、体積膨張に対する被破砕体の抵抗応力であり、静的破砕剤スラリーに対しては拘束圧となる。時間と共に膨張圧は増加するので、体積膨張は拘束圧の影響を受けることになる、この力学的な影響は考慮しなければならない。

さらに膨張圧発現を支配する要因は主に被破砕体の物性や篩理の有無などであるが、これらについて共通することは、静的破砕剤のある時刻における体積膨張量に対してどれだけの抵抗力を示すかであり、③の拘束度と同様である。

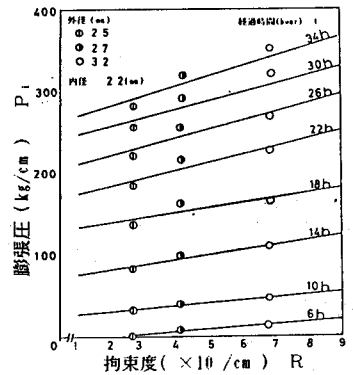
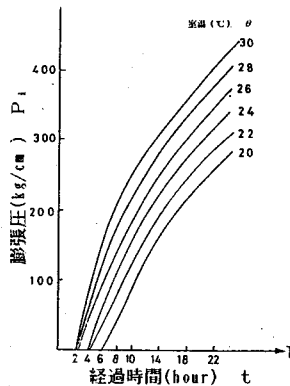
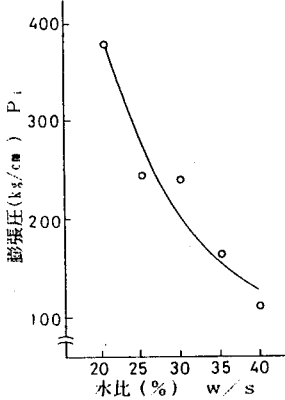


図-1 時刻tにおける膨張圧～水比関係図

図-2 各温度における膨張圧の経時変化

図-3 膨張圧～拘束度関係図

以上のことから、膨張圧発現を支配する要因は、①水比、②温度、③拘束条件と④時間（水と練り混ぜてからの経過時間）に大別され、膨張圧を関数の形で

$$P_i = P_i(w/s, \theta, R', t)$$

(2)

と表すことができる。

3. 膨張特性の表現方法

式(2)中の4つの要因において、水比 w/c 、温度 θ 、(時間 t)は水和反応およびその結果生じる体積膨張量に関する化学的なパラメータとすれば、拘束条件 R' はその体積膨張量と被破砕体の物性等との力学的な関係を示すパラメータである。静的破砕剤の膨張特性を考えた数値解析を行う場合、被破砕体となる材料の物性は各種材料試験により決定できるので、静的破砕剤の体積膨張量を考慮すると膨張圧と拘束度に替わる力学的パラメータとして力学系に導入することが可能となる。すなわち、膨張圧は体積膨張量を用いて計算でき、また拘束条件 R' は被破砕体の力学特性から導入される。いま、単位体積当たりの体積膨張量 Mv を

$$Mv = Mv(w/s, \theta, \sigma_R, t)$$

(3)

と表し、これを膨張特性と呼ぶことにする。

4. 膨張特性 Mv の測定

図-4に示す銅性の中空円筒セル（外径 $\phi 200\text{mm} \times$ 高さ 200mm 、内径 $\phi 40\text{mm} \times$ 高さ 160mm 、内径断面積 $A = 400\pi \text{mm}^2$ と内径に合う同じ材質のピストン（直径 $\phi 40\text{mm} \times$ 長さ 160mm ）を用いて各拘束圧下における膨張特性、すなわち体積膨張率 Mv の経時変化を測定した。なお、実験は 20°C 一定の恒温室内において行い、静的破砕剤スラリーの初期温度も 20°C とし、水比30%とした（式(3)中のパラメータ w/c 、 θ を一定とする）。静的破砕剤と水とを練り混ぜた時刻を測定開始時刻（0時）とし、スラリー体積 V は $A \times 100\text{mm}^3$ （充填孔底面より 100mm の位置まで充填）を基準とし、拘束圧は材料試験装置により一定荷重を与えて得た。実験開始より1時間毎に変位計によりピストンの変位を、また補正のためにセル側面円周方向ひずみをひずみゲージによって測定した。

膨張特性 $Mv(\sigma_R, t, w/s = \text{const.}, \theta = \text{const.})$ について拘束圧 σ_R をパラメータとして、時間 t との曲線を描くと図-5のような曲線群が得られた。この曲線群を (σ_R, t) 上の曲面として描くと図-6のようになる。

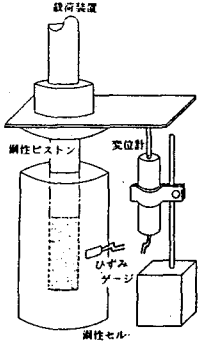


図-4 鋼性中空円筒セルの概略図

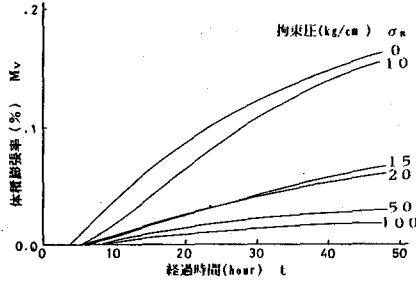


図-5 各拘束圧における膨張特性 Mv の経時変化

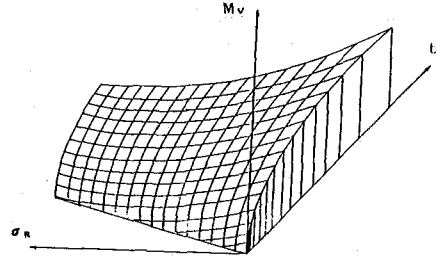


図-6 膨張特性 Mv の曲面表示

5. 膨張特性スペクトルと膨張特性関数 Mv の離散近似⁵⁾

図-6の曲面は $\sigma_R = \text{const.}$ の線上でも増加の方向に単調増加であり、 $t = \text{const.}$ の線上でも σ_R 増加の方向に単調減少である。したがって、Laplace変換を用いて

$$Mv(\sigma_R, t) = Mv_0 + \int_0^\infty \int_0^\infty \phi(\xi, \eta) e^{-\sigma_R \eta} (1 - e^{-t\xi}) d\eta d\xi \quad (4)$$

と書ける。 $\tau = 1/\xi$, $\omega = 1/\eta$ と置き換えると式(4)は次式と書ける。

$$Mv(\sigma_R, t) = Mv_0 + \int_0^\infty \int_0^\infty \mu(\tau, \omega) e^{-\sigma_R/\omega} (1 - e^{-t/\tau}) d(\ln \omega) d(\ln \tau) \quad (5)$$

$$\mu(\tau, \omega) = \phi(1/\tau, 1/\omega) / \tau \omega$$

ここで $\mu(\tau, \omega)$ を膨張特性スペクトルと呼ぶ。

膨張特性関数 $Mv(\sigma_R, t)$ を t に関して k 回微分すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial^k Mv}{\partial t^k} &= (-1)^{k+1} \int_0^\infty \int_0^\infty \phi(\xi, \eta) e^{-\sigma_R \eta} d\eta \xi^{-t} d\xi = (-1)^{k+1} \frac{k!}{t^{k+1}} \int_0^\infty \phi d(\xi; \sigma_R) \delta(\xi - k/t) d\xi \\ &= (-1)^{k+1} \frac{k!}{t^{k+1}} \phi(k/t; \sigma_R) = \lim_{k \rightarrow \infty} (-1)^{k+1} \frac{k!}{t^{k+1}} \phi(k/t; \sigma_R) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\phi d(\xi; \sigma_R) = \int_0^\infty \phi(\xi, \eta) e^{-\sigma_R \eta} d\eta$$

式(6)は次式となり、

$$\phi d(\xi; \sigma_R) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{(-1)^{k+1}}{k!} \left(\frac{k}{\xi}\right)^{k+1} \frac{\partial^k Mv(\sigma_R, k/\xi)}{\partial (k/\xi)^k} \quad (7)$$

$\tau = 1/\xi$ とおくと、

$$\mu d(\tau; \sigma_R) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{(-1)^{k+1}}{(k-1)!} (k\tau)^k \frac{\partial^k Mv(\sigma_R, k\tau)}{\partial (k\tau)^k} \quad (8)$$

ここで式(5)より

$$\mu d(\tau; \sigma_R) = \int_0^\infty \mu(\tau, \omega) (1 - e^{-t/\tau}) d(\ln \omega)$$

いま、漸近展開式(8)の第一近似($k=1$)を採用し、実験データから

$$\mu d(\tau; \sigma_R = \text{const.}) = t \frac{\partial Mv(\tau; \sigma_R = \text{const.})}{\partial t} \quad (9)$$

の曲線を種々の $\sigma_R = \text{const.}$ に対して描く(図-7)。この図より全域的なピーク点に対応する離散スペクトル点

$(\tau_1, \omega_1), (\tau_2, \omega_2), \dots$ を定めると、 $(\tau_1, \omega_1) = (30.0, 16.5)$ 。

こうして求めた (τ_1, ω_1) に対して膨張特性関数 Mv が

$$Mv = Mv_0 + \sum_k a_k e^{-\sigma_k / \omega_k} (1 - e^{-t / \tau_k}) \quad (10)$$

と表現される。ただし全域的なピーク点のみを $(\tau_k, \omega_k), k=1, 2, \dots$

の組として選ぶために式 (4) 中の二重積分は対角化されて表現されている。また、

$$a_k = \mu_d(\tau_k, \omega_k) \Delta \tau_k \Delta \omega_k / \tau_k \omega_k$$

であるが、係数 a_k は実験データより最小二乗法を用いて求める。誤差関数 E を

$$E = \frac{1}{2} [Mv - \{Mv_0 + \sum_k a_k e^{-\sigma_k / \omega_k} (1 - e^{-t / \tau_k})\}]^2 \quad (11)$$

を定義し、係数 a_k を連立方程式

$$\frac{\partial E}{\partial a_k} = 0, \quad k=1, 2, \dots \quad (12)$$

より決定すると、式 (10) より膨張特性関数 Mv は

$$Mv = -0.000046 + 0.204706(1 - e^{-t/30.0}) - 0.032776(1 - e^{-\sigma_k/16.5}) - 0.124484(1 - e^{-t/30.0})(1 - e^{-\sigma_k/16.5}) \quad (13)$$

を得る (この係数決定法の詳細は参考文献 6) を参照)。

6. 膨張特性関数 Mv の岩質材料への適用と問題点

膨張特性関数 Mv (13) では、水比と温度は一定とした。実際には破砕剤スラリーの岩質材料への浸潤や空気中での乾燥などによる水比の減少、発熱・熱伝導などの現象が膨張過程に著しく影響を与えると考えられる。すなわち、破砕剤スラリーは充填後、上述のような水比の減少や温度の影響により空気と岩質材料のそれぞれの境界面において内部よりも先に硬化が始まる。このため、空気との境界面 (自由面) への体積膨張は拘束され、その低減量が孔壁に作用し、拘束圧が発生する。実際の岩質材料に適用して破壊過程を数値的にシミュレートするには、各境界面での硬化特性 (あるいは体積膨張量の低減率) と先の膨張特性とを結合させて簡便に計算できるように。

7. おわりに

現在、硬化特性および体積膨張量の低減率について検討しており、その結果については講演発表当日に報告する予定である。

参考文献

- 1). 渡辺, 後藤, 松田: 静的破砕剤によるコンクリート構造物の解体に関する実験的研究, セメント技術年報, 36-40 (1982)。
- 2). 小柳, 六郷, 大野, 武藤: 静的破砕剤によるコンクリートの破壊, セメント技術年報, 36-39 (1982)。
- 3). 中川, 上藤, 新田: 静的破砕剤充てん孔に設けられた切り欠き, ガイドホールの効果について, 土木学会第38回年次学術講演会講演概要集 (1983)。
- 4). 河野: 非爆性破砕剤, Gypsum & Lime, No. 176 (1982)。
- 5). 山本: 物体の変形学, 誠文堂新光社 (1982)。
- 6). Y. Ichikawa, T. Kyoya, H. Nitta & T. Kawamoto: Microcomputer measurement determining plasticity spectrum in incremental theory, International Conference on Education, Practice and Promotion Computational Methods in Engineering Using Small Computers (EPMESC), Macau, August (1985)。

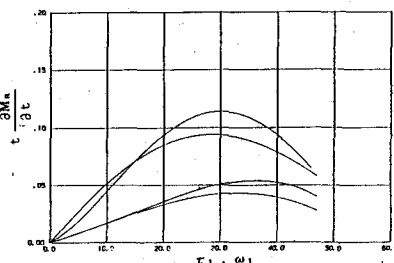


図-7 膨張特性スペクトルの離散近似

(14) Fracturing Process of Rock-like Materials in Use of Static Demolisher

Hiroki NITTA, Naoshi AOYAGI, Yasuaki ICHIKAWA, Toshikazu KAWAMOTO
Dept. of Geotechnical Engineering, Nagoya University

ABSTRACT

Static demolisher, which has been widely manufactured in the last several years, is used in some construction works because of its easy treatment, while it is slightly expensive. However, since its mechanical characteristics are influenced by many factors, neither experimental work nor theoretical treatment has provided to guess the fracturing process of rock in use of the static demolisher.

In this paper, we present some experimental results for the static demolisher to check its expansion rate, then it is examined that the process is evaluated by a function of four parameters such as the water ratio to the static demolisher, the temperature, the constrained pressure and the time after blended. Thus, the expansion rate is expressed as

$$Mv = Mv(w/s, \theta, \sigma_R, t)$$

where w/s is the water/static demolisher ratio, θ the temperature, σ_R the constrained pressure and t the time.

In practical sense, the surface of static demolisher is easily dried out after blended, and some water in it will diverge into rock. This causes relative hardening of the surface or the interface of the rock. This may be main mechanism to fracture the rock. However, it is highly complex procedure, so that we present here a simple form for the above function of the expansion rate.