[92]　静的破砕剤によるコンクリートの破砕設計法に関する研究

正会員　○石橋孝治（足利工業大学工学部）
正会員　　渡辺　明（九州工業大学工学部）
正会員　　原田哲夫（長崎大学　　工学部）
正会員　　出光　隆（九州工業大学工学部）

1　まえがき

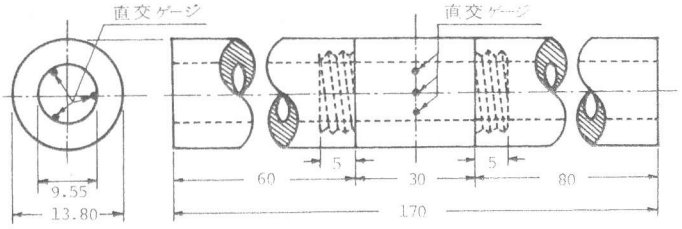
コンクリート構造物や岩石の解体工事環境が厳しい制約を受ける今日、静的破砕剤を用いた解体工法が注目を集めている。この工法は静的破砕剤の水和反応に伴う膨張圧を利用する工法であるが、開発以来の歴史が浅いこともあり、破砕の主役をなす膨張圧の推定方法、膨張圧による破砕のメカニズムなど基本的な事柄について不明な点も多く、合理的な破砕設計法が確立されるまでには至っていない。そこで、本研究では膨張圧特性を明確に把握するために新たに圧力変換器を製作し、これを用いた無筋コンクリートの破砕時膨張圧の測定と破砕時間の推定法について半理論、実験の両面から検討を行った。

2　膨張圧の測定

（a）膨張圧の測定法

膨張圧を測定するために種々の原理に基づいた圧力変換器が用いられるが、破砕剤スラリーと圧力変換器の相対的な位置関係から膨張圧の測定法は直接法と間接法に大別することができる。前者は破砕剤スラリー中に圧力変換器を設置して直接に、後者は圧力変換器の中に破砕剤スラリーを充塡して膨張圧の測定を行う方法である。

一般に、間接法で使用される圧力変換器では鋼管の外周面に直交ひずみゲージを貼付してひずみを計測し、内圧を受ける厚肉円筒理論式を用いて膨張圧を算定する。この方法には破砕剤の膨張圧特性は良好に捕捉することができるが、被破砕体と鋼管の拘束度の相似性の問題から膨張圧の評価に関して的確性に問題があると考えられる。そこで、本研究では直接法により膨張圧を測定することとし、このための圧力変換器を製作した。図－1に圧力変換器の概略を示す。製作した圧力変換器では鋼管の内周面の3等分点に直交ひずみゲージを貼付してひずみを計測し、外圧を受ける厚肉円筒理論式を用いて膨張圧を算定する。[1]間接法で使用される圧力変換器も本研究で新たに製作した圧力変換器も鋼管を利用したものであり、ここでは前者を"外管法"、後者を"内管法"と称することとする。



図－1　圧力変換器の概略図

厚肉内筒理論によれば、膨張圧Pおよび軸方向応力σ_zは軸方向にも半径方向と同じ膨張圧Pが作用するものとして測定された鋼管の円周方向ひずみε_θと軸方向ひずみε_zを用いて外管法、内管法それぞれについて次式で与えられる。

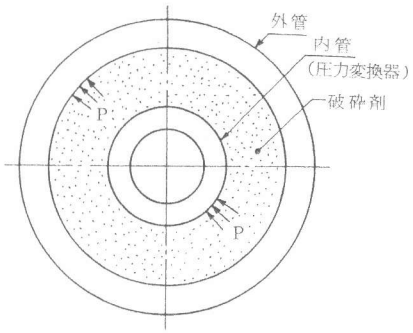
$$P=\frac{E_s(k^2-1)}{2(1+\nu_s^2)}(\varepsilon_\theta+\nu_s\varepsilon_z) \quad \cdots\cdots(1) \qquad \sigma_z=\frac{E_s}{1-\nu_s^2}(\varepsilon_z+\nu_s\varepsilon_\theta) \quad \cdots\cdots(2) \qquad \text{（外管法の場合）}$$

$$P=-\frac{E_s(k^2-1)}{2(1+\nu_s^2)k^2}(\varepsilon_\theta+\nu_s\varepsilon_z) \quad \cdots\cdots(3) \qquad \sigma_z=\frac{E_s}{1-\nu_s^2}(\varepsilon_z+\nu_s\varepsilon_\theta) \quad \cdots\cdots(4) \qquad \text{（内管法の場合）}$$

ここに、E_s，ν_sはそれぞれ鋼管の弾性係数とポアソン比であり、kは鋼管の内径に対する外径の比である。

（b）内管法の検証

内管法で用いる圧力変換器が、被破砕体に作用している膨張圧をどの程度の精度で検出できるかを確認する目的で、図－2に示すような内管法と外管法を併用した2重鋼管試験を行った。試験の性格から、内管と外管に関する情報を区別するために前者にはi，後者にはoの添字を、破砕剤については添字bを付けることとする。

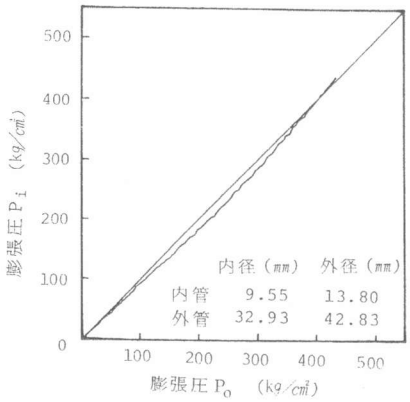


図－2　2重鋼管試験

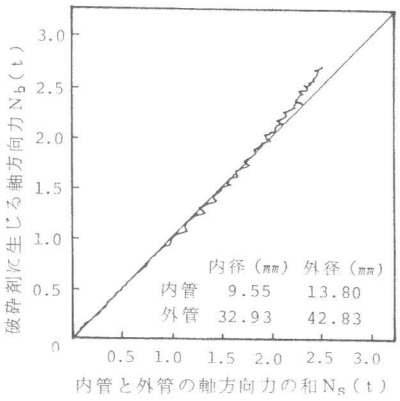
図－3は内管および外管から求めた膨張圧P_iとP_oの関係を示したものである。同図においてP_iとP_oは良好な一致を示しており、内管法により被破砕体に作用する膨張圧を実用上充分な精度で測定できることが明らかとなった。内管の外周面と外管の内周面には摩擦による拘束が存在するため、軸方向にも膨張圧が生じるものと考えられる。そこで内管に作用する膨張圧が軸方向にも作用するものとして、破砕剤に生ずる軸方向力N_bと内，外管に作用する軸方向力N_sとの関係を図－4に示した。なお、N_b，N_sは断面積をA，鋼管と破砕剤の接触面積をSとしてそれぞれ次式で算出される。

$$N_b = A_b \times P_i \quad \cdots\cdots (5)$$

$$N_s = S_o \times \sigma_{zo} + S_i \times \sigma_{zi} \quad \cdots\cdots (6)$$



図－3　膨張圧P_iとP_oの関係

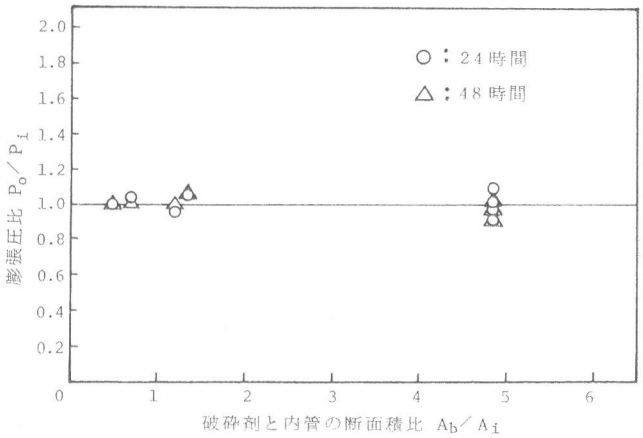


図－4　軸方向力

同図においてスティックスリップを呈しながらもN_bとN_sは良好な一致を示しており、膨張圧は流体圧と同様な挙動をするものと推察される。また、式(1)～(4)における仮定の妥当性が示されたものと考えることができる。

図－5は外管の直径を変えた場合の膨張圧比P_o/P_iと破砕剤スラリーの断面積比A_b/A_iとの関係を示したものである。同図よりP_o/P_iはA_b/A_iすなわち充填する破砕剤スラリーの量や時間的な影響をほとんど受けないことが明らかとなった。

以上の検証実験から、内管法により被破砕体に作用している膨張圧を良好な精度でしかも安定して測定できることが明らかとなった。



図－5　P_o/P_iとA_b/A_iの関係

3　破砕時間の推定

無筋コンクリートの破砕時間を推定するために図－1に示した圧力変換器を用いて内管法によるモデル実験を行った。被破砕体として内径32mm，高さ150mmの外径を種々変化させた円筒供試体を強度の異なるコンクリートで製作し、実験に供した。使用した静的破砕剤の水・破砕剤比は25%であり、実験はすべて室温20℃の恒温室で行った。

円筒コンクリート供試体の内径に対する外径の比Kが12.5以上の供試体について、実測された膨張圧の経時変化を最小二乗法で処理した回帰曲線を図－6に示す。回帰曲線式として次式を得た。

$$P = 418 - 560 \exp\{-0.0460\,T\} \qquad \cdots\cdots (7)$$

供試体内の円周方向平均引張応力$\bar{\sigma}$が、材料自身の引張強度σ_tに達したときひびわれが発生（破砕）するものと考えれば、厚肉円筒理論に基づいて次式に示す関係式が導出される。[2)]

$$\sigma_t = \bar{\sigma} = \frac{P_u}{K-1} \qquad \cdots\cdots (8)$$

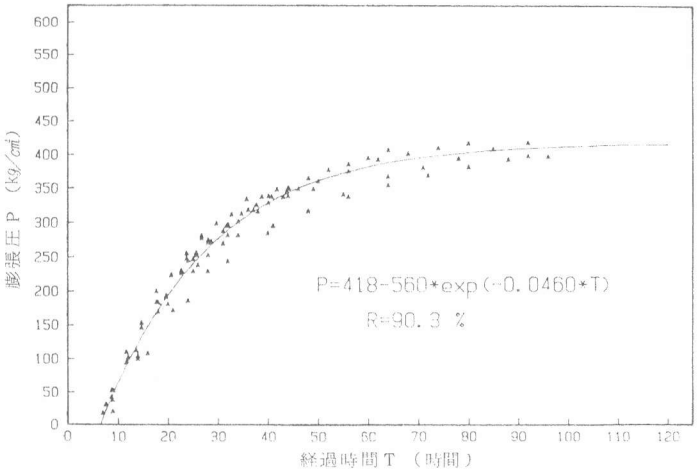
ここに、P_uは破砕時の膨張圧である。そこで本モデル実験の結果を基に P_u/σ_t とKの関係をまとめたものを図－7に示す。同図によれば、ほぼK＝7.5を境とする2通りのP_u/σ_tとKの関係が認められる。すなわち、K＜7.5の場合には式(8)を変形した

$$P_u/\sigma_t = K-1 \qquad \cdots\cdots (9)$$

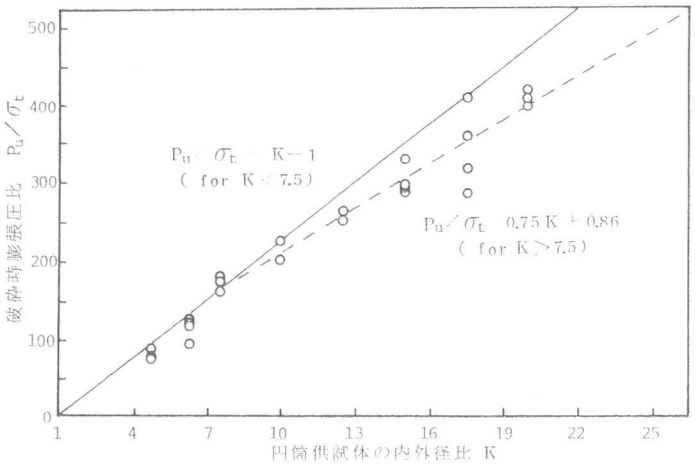
で与えられる関係をほぼ満足しているのに対し、K＞7.5の場合には最小二乗法で処理して得られる

$$P_u/\sigma_t = 0.75K + 0.86 \qquad \cdots\cdots (10)$$

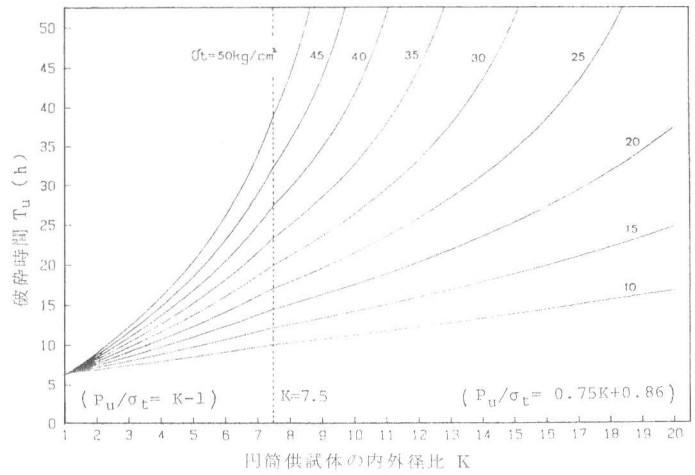
で代表される関係が認められる。これらの関係は観察された破砕モードにも反映しており、K＜7.5では瞬時にひびわれを生じて破砕するのに対して、K＞7.5では遂次ひびわれが伸長して破砕するという現象と一致する。膨張圧の増加に伴い塑性域が拡大すれば当然のことながら弾性域は縮小する。しかも弾性域は膨張圧による内部応力に加えて塑性域から塑性化に伴う内部応力の配分を受ける。したがって、K＝7.5は塑性域におけるひびわれの成長をコントロールできる拘束剛性を供試体に与える下限の条件であると考えることができる。



図－6　内管法による膨張圧の経時変化と近似式



図－7　P_u/σ_t とKの関係



図－8　破砕時間とKの関係

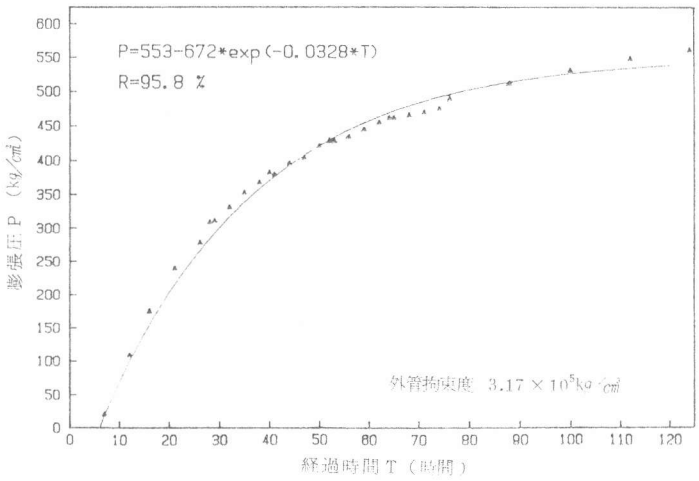
以上の結果から、被破砕体材料の引張強度σ_tとKを式(9)または(10)に代入して破砕に必要な膨張圧P_uを算定し、これを用いて式(7)から破砕時間を推定することが可能となる。図－8は引張強度をパラメーターにとり、K＝7.5を境とするP_u/σ_tとKの関係を考慮した

一連の作業を行って破砕時間TuとKの関係を示したものである。同図を用いれば破砕時間の推定を一段と容易に行うことができる。また、同図から逆に、被破砕体材料の引張強度と要求する破砕時間を与えKを求めれば穿孔間隔を定めることもでき、破砕設計を行うことができる。

現場への適用に際しては、あらかじめ試験孔による膨張圧の測定を行えば、温度等の外部環境の影響を考慮した膨張圧の経時変化曲線を求めることができるので、さらに合理的な破砕設計が行えるものと考えられる。

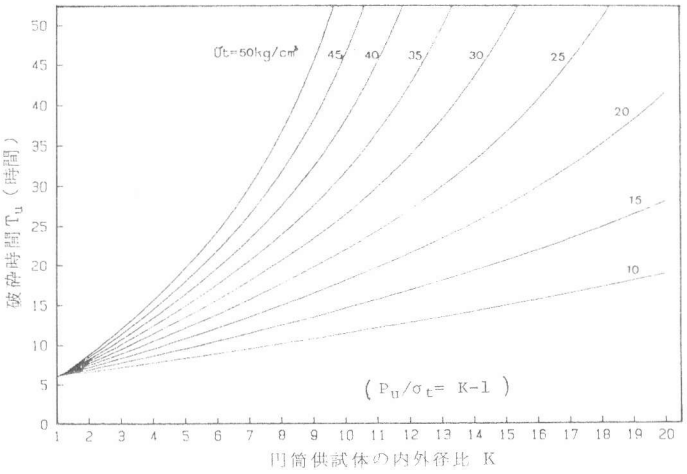
図－9は外管法により測定された膨張圧の経時変化曲線である。最小二乗法で処理した回帰曲線式として次式を得た。

$$P = 553 - 672\exp\{-0.0328\,T\} \qquad \cdots\cdots(11)$$



図－9　外管法による膨張圧の経時変化と近似式

図－10は式(9)と式(11)を用いて引張強度をパラメーターとした破砕時間TuとKの関係を計算し図示したものである。同図において、おおよそ $\sigma_t < 35kg/cm^2$ かつ $K < 15$ の範囲内のTuとKの関係から求められるTuは、図－8中のTuとKの関係から求められるTuと比べ約10%の差を生じる程度である。コンクリート構造物を構築する際、一般に最も用いられるコンクリートの引張強度を考えれば、簡便に行える外管法により測定した膨張圧の経時変化曲線の近似式と式(9)を用いて破砕時間を推定しても実用上の支障はないものと考えられる。



図－10　破砕時間とKの関係

4　結論

本研究で明らかとなった事柄をまとめて列挙する。

(1)　筆者らが製作した圧力変換器を用いた膨張圧の測定法（内管法）により外部環境の影響を包括した膨張圧の直接測定が簡便にしかも精度良く行うことができる。

(2)　膨張圧の圧力伝播は流体のそれと同様な挙動を示す。

(3)　内管法により被破砕体の標準的な膨張圧の経時変化曲線を求めておけば、穿孔情報Kと被破砕体材料の引張強度 σ_t を与え式(9)または式(10)を用いて破砕時間を推定することができる。

(4)　外管法により測定した膨張圧の経時変化曲線を基に推定される破砕時間は $\sigma_t < 35\,kg/cm^2$ かつ $K < 15$ の範囲内であれば、内管法により測定した膨張圧の経時変化曲線を基に推定される破砕時間と比べ大差はなく、外部環境の現場との整合についての配慮を行えば、外管法による破砕時間の推定も有効となろう。

参考文献

1)　出光　隆，竹田宣典：静的破砕剤によるコンクリートの破砕に関する研究－膨張圧測定と破砕時間の推定－，土木学会第38回土木学会年次学術講演概要集V，1983，P539～P540

2)　渡辺　明，後藤　司，松田　浩：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，36，1982，P183～P186