

静的破碎剤を用いた岩質材料の破碎について

山口大学 中 川 浩 二, 山 本 隆 典, 田 中 英 昭
徳山高専 工 藤 洋 三, 橋 本 堅 一

1. はじめに

市街地における岩盤の掘削、破碎やコンクリート構造物の解体は建設工事においてしばしば必要となる。そのための方法として、騒音、振動、落石、粉塵などを伴なわないいわゆる低公害破碎（解体）工法がいろいろの立場から研究、開発されてきている。

最近開発され、かつ用いられてつあるセメント系静的破碎剤はこの目的をある程度満たすものであるが、その歴史が浅いため膨脹圧の発現やその力学特性の解明もまだ十分ではなく、さらには膨脹圧の発現による岩質材料の破碎の機構に関する資料はほとんど見られず、従ってこれを用いた破碎設計法の確立は望まれるところである。筆者らは、環境変化にともなう破碎剤の膨脹圧の発現、破碎剤による岩質材料の破碎条件についての研究を進めているが、ここではこの一部を報告する。

2. 静的破碎剤の膨脹圧発現について

セメント系静的破碎剤は、 CaO の水和にともなう膨脹圧と、珪酸塩の水和にともなう硬化の速度がうまく適合するように工夫されたものとされている。そのため膨脹圧の発現に影響を与える要因として種々のものが考えられるが、静的破碎剤を岩質材料の破碎に用いる上で考慮すべき主なものとして、1) 破碎剤と水との重量比（水比）、2) 温度、3) 体積などをあげること加える。

これらの要因のうち、水比、温度などによる膨脹圧の発現の変化については、膨脹圧発現が前述の CaO および珪酸塩の水和反応によることを考慮すれば当然と考えられる。しかし、破碎剤を充填する孔の径による発現膨脹圧の変化については検討する必要があると思われる。これに関する簡単な実験を行った。破碎剤としては小野田セメント社製プライスター150（春秋用）を用いている。まず長さ50 cmの構造用炭素鋼鋼管の一端を鋼板に溶接する。鋼管内に破碎剤を充填し、鋼管の外周の高さ25 cmの位置にはられた電気抵抗式歪計（ひずみゲージ）により円周方向のひずみを測定し、厚肉円筒理論により膨脹圧を求めた。ひずみ計測には共和電業社製デジタル測定器UCAM-5Aを用いた。また長時間計測にともなうドリフト検定のため、破碎剤を充填しない鋼管にはりつけたひずみゲージからの出力をも計測し、ひずみ値が15 μ 以下であり、ドリフトはほとんど無視できることを確認している。

孔径の変化による膨脹圧の変化を調べため、鋼管内径を12.7 mm, 17.7 mm, 29.4 mmとした場合に計測された膨脹圧を図1に示す。これによると、膨脹圧の発現は前二者については完全に一致しているが、29.4 mmのものについてはいくらか早く

膨脹圧の発現があり、かつある程度の時間経過後は逆に低くなる傾向にあるのがみられる。そしてこの場合には、破碎剤を鋼管に充填後しばらくして鋼管が熱くなるのがみられたのに対して、前二者においては顕著な発熱現象はみられていない。このことより、29.4 mmの鋼管においては膨脹圧の発現が早くなる

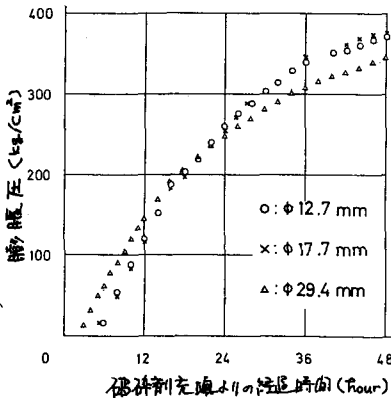


図1 鋼管内径の変化による膨脹圧の差(12.7)

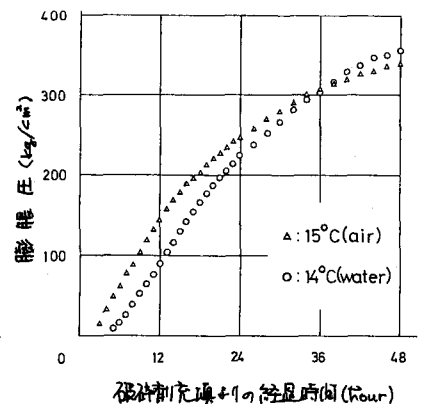


図2 気中と水中における膨脹圧の発現(φ29.4mm)

のは、水和熱の発生により水和反応が加速されたためであると考えられる。この点について検討を行うため、水和により発生する熱を吸収すべく、鋼管を水中に保持して計測を行った場合の応力値を、気中における計測値と同じ29.4mm鋼管について図2に比較している。水温が若干低く約14℃程度であったが、この場合には孔径の小さい本の実験値とはほぼ同じ傾向の結果が得られた。

同一の破砕剤を異なる温度条件で用いるとき、温度が高いときには膨脹圧の発現は早く、温度が低い時には遅くなることから報告されている。このことを考慮すると、孔径の増加とともに膨脹圧発現の増加は、破砕剤の量の増加とともに水和熱の発生により、破砕剤内部の温度が上昇し、水和反応が加速されることによるものであると考えられる。このことは膨脹圧の発現が支中にあるものによって計測されるものと、岩質材料中の発現するものとは異なる可能性があることを示しているといえよう。また発熱が顕著とならない場合には膨脹圧の発現は孔径によらないと考えられよう。

3. 静的破砕剤による岩質材料の破砕条件について

爆破により岩盤を破砕する場合はいわゆるハウザーの公式 $L = CW^3$ (C は係数、 W は抵抗距離)をもとに薬量計算が行われる。またスムーズ"スティング"(含フリスプリング)を行なう場合には孔間隔は60cm～1m程度とられるのが普通であり、その場合にも孔の長さ当りの薬量が半実験的に定められる。

これにくらべて、静的破砕剤を用いた岩質材料の破砕を行なう場合には、爆破における薬量に対応するような考え方は今のところ見られず、経験的に36～42mm程度の孔径に対する孔間隔が適然と与えられているようである。しかし破砕剤を用いる場合には孔径の選定は大きな意味をもつ。すなわち破砕剤は充填した孔を完全に充填して使用されるため、孔径の増大は破砕剤の使用量を著しく大きくし、破砕の経済性に大きな影響を与える。ここではスムーズ"スティング"などで必要とされるような一つの破断面と岩質材料中に発生させるために必要な孔径と孔間隔についての検討を行なうことにする。

いま図3のように、一つの破断面に沿う岩質材料の破断を考え、孔径 D の孔を孔間隔 a で配置したとする。その時各孔に充填された破砕剤の膨脹により孔からクラックが放射状に発生・発達し、かつ隣接孔からの応力場の影響を受け孔間のクラックによる連結が生じて破断面が形成される。すなわち破砕剤の膨脹とともにクラックの発生・発達はクラック先端の応力集中と周囲の応力場の状態により支配されることとなり、非常に複雑な現象となる。このことを考慮すると、このクラックの発生・発達に関する厳密な解析は困難であるといえよう。

ここで簡単のため、クラックの発生・発達を無視し一つのつり合い状態を考える。いま長さ L にわたる破断面の形成を、孔径 D の孔を M 孔等間隔に穿つことにより行なうとする。孔内の膨脹圧が P_i になったとすると、この破断面に沿って破断を生じようとする力は孔の単位長さ当り MDP_i として与えられる。これに対して

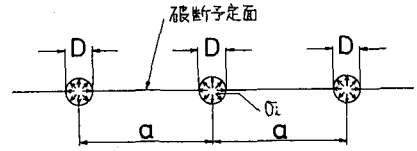


図-3 破断面断面での孔の配置

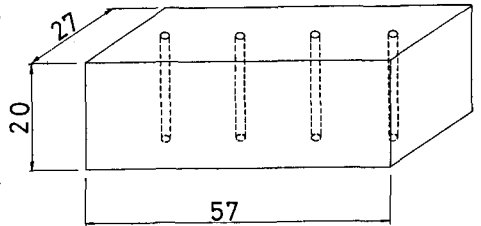


図-4 供試体の概形

	設計強度	圧縮強度	引張強度
1	180	246	266
2	300	341	289
3	400	417	315

表-1. 用いたコンクリートの強度

孔径 (mm)	6	5	4	3	2	円柱
8.5	52.0 10.9	42.5 13.4	34.5 16.8	25.5 22.3		8.5 17.6
10.0	60.0 9.5	50.0 11.4	40.0 14.25	30.0 19.0		10.0 15.0
12.5	75.0 7.6	62.5 9.1	50.0 11.4	37.5 15.2		12.5 12.0
15.0	90.0 6.3	75.0 7.6	60.0 9.5	45.0 12.7		15.0 10.0
18.0		90.0 6.3	72.0 7.9	54.0 10.6		18.0 8.3
22.0	上段: (円柱) (3本)		88.0 6.5	66.0 8.6	44.0 12.9	22.0 6.8
26.0	下段: (孔間隔) (3本)			78.0 7.3	52.0 11.0	26.0 5.8

表-2. 供試体中の孔径と孔数

これに対して、破断に抵抗する破断面の強度は、

$(l-mD)\sigma_t$
(ただし σ_t は材料の引張強度)と与えられ、両者が等しくなる時に破断が生じると考えると次式が与えられる。

$$mD\sigma_i = (l-mD)\sigma_t$$

しかし実際には破断面の形成は孔壁からのクラックの発生・発達によって生じるため、上式にある係数を乗じた式

$$RmD\sigma_i = (l-mD)\sigma_t \quad \text{-----①}$$

が考えられる。係数 R は破断されるべき材料の定数であり、特に材料の脆性度などの影響を大きく受けると考えられる。ここでは上式の有効性を検討するための実験を行っている。

1) 供試体

供試体の形状は、 $\phi 15 \times 30$ cm の円柱供試体および図4に示すような $57 \times 27 \times 20$ cm の直方体供試体である。供試体材料にはレディミクストコンクリートを用い、最大骨材寸法 20 mm、スランプ 8 cm とした。設計強度は、円柱供試体については 300 kg/cm²、直方体供試体については 180, 300, 400 kg/cm² の3種のものを用いている。それぞれの材料の千円圧縮および引張(割裂)強度を表1に示す。円柱供試体では供試体中央に1本、直方体供試体では長手方向中心線に沿って2~6本の孔を所定の孔径、孔間隔で、ほぼ供試体底に至る深さで設けた。作製した供試体の孔径、孔数を表2に示す。表2には対応する孔数、孔径に対して、 $(\text{孔数}) \times (\text{孔径})$ および $(\text{孔間隔}) / (\text{孔径})$ の値を記入している。

孔は打設時に所定の丸棒を埋め込み、コンクリートの半硬化後引き抜くことにより作製している。また打設後1日で脱型、その後湿潤状態を保つように努め、材齢4個で実験に供している。直方体供試体の場合、破断予定面と垂直な方向の破断、分離を防ぐ目的で、6mm 丸鋼を供試体の外壁に沿って、破断予定面の両側に2段に配筋している。

2) 充填、観察、計測

温度 15°C、湿度 60% の恒温室内に、破砕剤充填12時間前に供試体を搬入し、湿度条件の保持に努めた。破砕剤充填6時間後より一時間毎に供試体表面を観察し、表面にあけるクラ

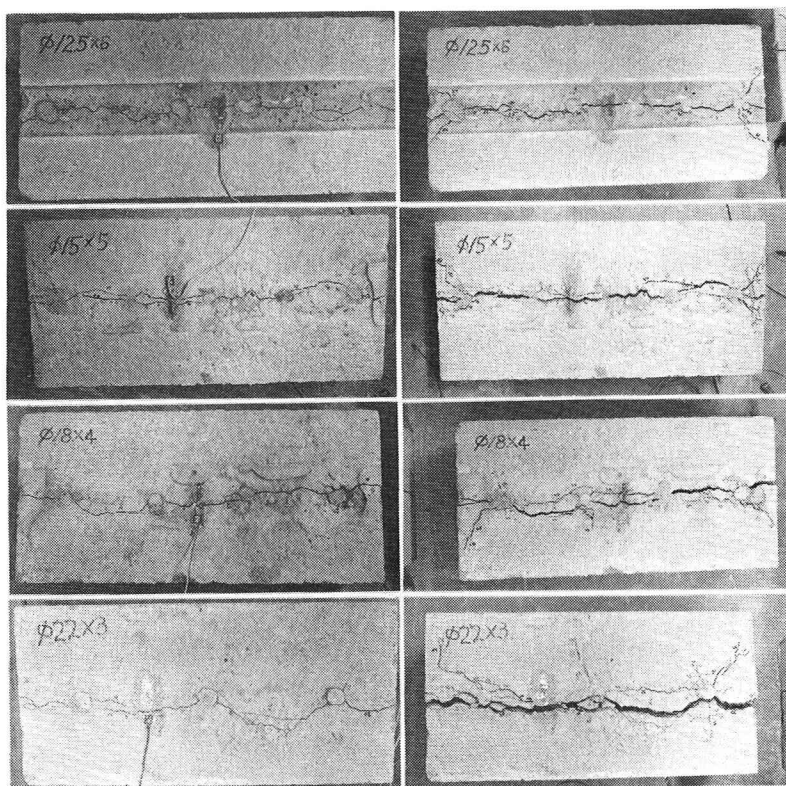


写真 破砕剤による破断面の形成と成長 左: 充填24時間 右: 充填48時間

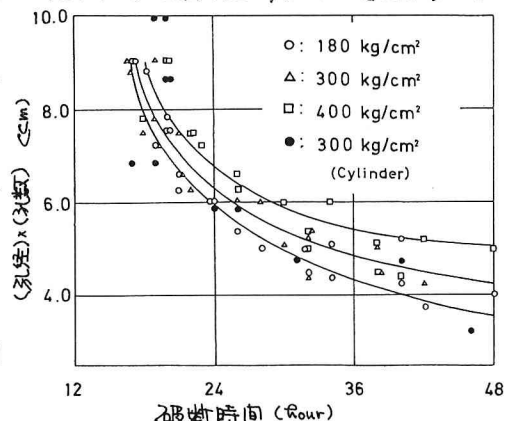


図5 (孔数)×(孔径)の値による破断時間の考へ

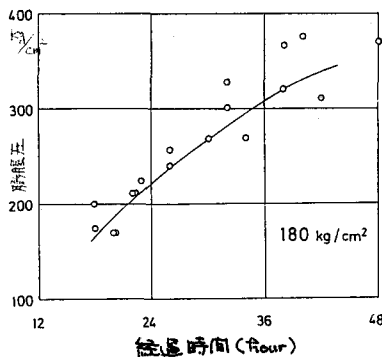


図-6 設計強度180kg/cm²の供試体中の発生膨脹圧

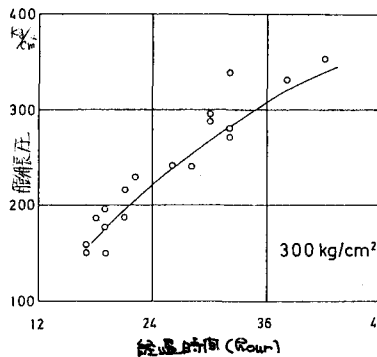


図-7 設計強度300kg/cm²の供試体中の発生膨脹圧

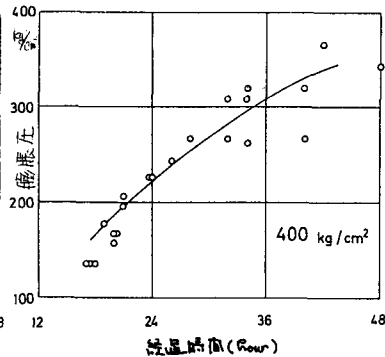


図-8 設計強度400kg/cm²の供試体中の発生膨脹圧

ックの発生、発達を観察、記録した。破砕剤に対する水比は30%、温度は15℃である。供試体表面に発生、発達するクラックには種々のレベルのものが考えられるが、肉眼で可視となるものをクラックとして扱い、円柱供試体とはクラックが供試体を横切った状態、直方体供試体とはクラックが連続し、供試体を縦断した状態をも、2供試体が破断したとした。

3. 結果と考察

代表的な供試体について破砕剤充填後24時間および48時間後の供試体表面の写真例を示す。24時間後では、発生したクラックはまだ写真で判読できるほどに拡がっており、クラックをインクでトレースして示している。48時間後にはクラックの幅は大きく拡がり、明瞭な分岐を示している。このことは図1および図2にみられるように24時間以後48時間に至るまでの間に破砕剤が大きく膨脹したということを示している。また最後に発生、発達するクラックはかならずしも孔間を直線上に連結するものではなく、屈曲の程度は孔間が大きいほど大きい。そして大きく拡がるクラックはかならずしも最初に発生したクラックとは限らないことが認められる。

供試体破断時の破砕剤充填からの時間を供試体の(孔数 m) $\times$ (孔径 D)に対して示したものが図5である。図によると若干のばらつきはみられるが、それぞれの配合のコンクリートに対して供試体の $m \times D$ の値により破断時間が与えられるようである。この図には円柱供試体の実験結果を(孔間隔)/(孔径)に対応して(供試体の直径)/(孔径)に換算して併せて示している。

先に示した式(1)により破断のための条件が与えられたとすると破断時刻における孔内の膨脹圧は

$$\sigma_c = (1 - mD) \sigma_c / (RmD) \quad \dots \dots (2)$$

となる。すなわち、この式は鋼管を用いて計測された膨脹圧と一致すべきことになる。そこで各配合のコンクリートごとに $(1 - mD) \sigma_c / mD$ を求め、破断時刻に対応する膨脹圧を示したものが図6～8である。ここで比較のため仮に $R = 1$ とし、鋼管により計測された膨脹圧の値を併せて示している。鋼管による膨脹圧は、実験が15℃で行われかつ発熱が重じなかったものとして孔径17.7mm、気中において計測したものをを用いている。これらの図より $R = 1$ において破断時刻より推定される膨脹圧は、鋼管により計測される膨脹圧と良い一致を示しており、式(1)の考え方が破断条件が与えられることを示しているといえよう。いま係数 R は破砕剤充填からのクラックが発達する距離により影響される係数と考えられ、前述のように材料の性質(特に膨脹度など)により支配される。しかし、本実験で用いたコンクリート供試体においては若干の差はあるが、配合にかかわらず $R = 1$ と置くことによりほぼその破断時刻を $m \times D$ の値から予測できるようなのである。

4. 謝辞

本研究を行うにあたり、小野田セメント(株)より破砕剤「グイスター150」の提供をいただいた。ここに謝意を表す。また実験に当り、山口大学ならびに徳山商専の学生諸君の協力を得たことに併せて感謝する。

Static demolition of rock-like materials

Koji Nakagawa, Yozo Kudo, Ken-ichi Hashimoto,
Takanori Yamamoto and Hideaki Tanaka

Static demolisher, which expands gradually by hydration of CaO and some kind of silicates, seems to be useful in rock excavation or demolition of old buildings in urban area.

In this study, the condition between the hole diameter and the hole spacing which give the contour formation in a mass of rock-like materials was discussed. Then a simple formula

$$knD\sigma_i = (l - nD)\sigma_t$$

which gives the contour formation condition was proposed and its applicability was confirmed experimentally. Here, l and D are the contour length and hole diameter respectively. σ_i is the swelling pressure of the demolisher and σ_t is the tensile strength of the material. n is the number of holes and k is a material constant.

A series of experiments were conducted by using concrete specimen and demolisher " Brister 150 " by Onoda Cement Co. Ltd.. With the constant $k=1$, the crack formation through the specimen was predicted using the formula.