

衝撃圧を受けるスタークラックの 動的挙動について

岡山大学大学院 ○学生員 鍋野博章
岡山大学工学部 正会員 廣瀬壮一

1. はじめに

現在の発破工法の課題の一つに周辺環境への影響や、掘削の効率性、経済性を考慮した発破制御の問題がある。具体的には、爆破孔の周辺に切り欠きやディスクを付けてクラックの発生や進展を制御する方法があるが、その理論的裏付けは十分であるとは言えない。このような背景をもとに、本研究は、円孔から放射状にでた複数のクラック、いわゆるスタークラックの動的挙動を数値的に明らかにしたものである。本報では、特にその解析法についての提案を行い、また、衝撃圧を受けるスタークラックの挙動について一解析例を示す。

2. 解析法

図1に示すような二次元平面ひずみ状態にある無限弾性体内の円孔 S から放射状に伸びたスタークラック S_c を考える。円孔の半径は a で、圧力 $P(t)$ が内壁に垂直に作用するものとする。円孔から放射状に伸びるクラックの本数は n 本 (図1では $n=6$) とし、クラックの長さは二種類のものが交互にあるものを考えた。解析では、発破に伴って発生するガス圧はクラック面 S_c には影響しないと仮定し、 S_c 上では常に0とした。すなわち境界条件は、

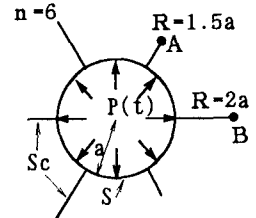


図 1

$$t(x, t) = -P(t)n(x), \quad x \in S, \quad t(x, t) = 0, \quad x \in S_c \quad (1)$$

により与えられる、ここに、 t は表面力、 n は法線ベクトルを表す。解析は、時間域境界要素法を用いて行った。上述の境界条件を考慮すると、 S 、 S_c 上の点に対しては、次の変位型境界積分方程式、応力型境界積分方程式を得る。

$$\frac{1}{2}u(x, t) = \int_0^t dt' \int_S ds_y G(t-t', x-y) \{-P(t')n(y)\} - \int_0^t dt' \int_S ds_y H(t-t', x-y) u(y, t') \\ - \int_0^t dt' \int_{S_c} ds_y \bar{T}(\partial_x) H(t-t', x-y) [u(y, t')], \quad x \in S \quad (2)$$

$$t(x, t) = 0 = \int_0^t dt' \int_S ds_y \bar{T}(\partial_x) G(t-t', x-y) \{-P(t')n(y)\} - \int_0^t dt' \int_S ds_y \bar{T}(\partial_x) H(t-t', x-y) u(y, t') \\ - \int_0^t dt' \int_{S_c} ds_y \bar{T}(\partial_x) H(t-t', x-y) [u(y, t')], \quad x \in S_c \quad (3)$$

ただし、 u 、 t 、 $[u]$ はそれぞれ変位、表面力、開口変位を、 G 、 H は一重層核、二重層核を、 $\bar{T}(\partial_x)$ は表面力作用素を表す。式 (2)、(3) を離散化すると、各時間ステップごとに u 、 $[u]$ を未知とする連立一次方程式を構成することができる。なお、本研究では次のような計算上の工夫をして解析の効率化を図った。

○モデルの幾何学的対称性の利用：用いる解析モデルは、ほとんどが幾何学的に対称である。このことを利用して解くべき連立一次方程式の数を減らすことを行った。これにより積分に要する計算時間ならびに計算容量をおよそ (1/対称性) にすることが可能となった。

○時間項と空間項の分離：上述の境界積分方程式を数値的に解く際、過去の時間ステップからの影響係数を全て記憶しておくことが必要となる。時間ステップの大きい場合は、その記憶容量は膨大なものとなり負担を与えることになる。そこで被積分項を時間と空間に分離し、空間に関する積分値だけを記憶する方法を採用した。例えば、式 (2) の右辺第 2 項は $x = x_p$ 、 $t = M\Delta t$ において、

$$I(x_p, M\Delta t) = \sum_q \sum_m u(y_q, m\Delta t) \int_{S_q} \bar{H}((M-m)\Delta t, x_p - y) ds_y \quad (4)$$

と離散化されるが、 $\bar{H}$ にはまだ時間項と空間項が混在している。そこで、 $(M-m)\Delta t \gg |x_p - y_q|$ の場合に、 $\bar{H}$ をテイラー展開して時空間を分離すると、積分値 I は次のように表される。

$$I(x_p, M\Delta t) = \sum_{q'} \sum_{m'} u(y_q, m\Delta t) \int_{S_q} \bar{H}((M-m)\Delta t, x_p - y) ds_y \\ + \sum_{q'} \sum_{m'} u(y_q, m\Delta t) \sum_l \bar{H}_l^{time}((M-m)\Delta t) \int_{S_q} \bar{H}_l^{space}(x_p - y) ds_y \dots\dots\dots (5)$$

右辺第2項の (q', m') の組は、 $(M-m')\Delta t \gg |x_p - y_{q'}|$ を満足するもので、右辺第1項はそれ以外の (q, M) の組を表す。また l に関する総和はテイラー展開によるものである。境界要素法では積分に最も計算時間を要するが、上式のように時空間を分離することにより積分は時間に無関係となり計算容量もかなり節約できることになる。

3. 解析結果

図1に示した $n=6$ の解析モデルについて、図2～5に示す様に、4通りの圧波形 $P(t)$ が作用した場合のクラック先端A、Bでの応力拡大係数 $K_{I(A)}$ 、 $K_{I(B)}$ の経時変化を計算した。境界要素法に用いたパラメータは、要素長さ $\frac{a}{10}$ 以下、時間刻み幅 $\frac{c_T \Delta t}{a} = 0.15$ (c_T :S波速度)、ポアソン比は0.25とした。結果より次のことが言える。○長さの異なるクラックが混在するとき、長いクラックでの K_I 値がより大きいピーク値を示し、破壊進展しやすい。○比較的緩やかに圧波形の加わる図4、5の場合は $K_{I(A)} > K_{I(B)}$ となる時間が長いのに対し、衝撃的に加わる図2、3の場合では、 $K_{I(A)} > K_{I(B)}$ となる時間が短くそのときの K_I 値の差が大きい。○衝撃的に圧波形の加わる図2、3の場合では高周波の要素を含んでいる。○圧波形の立ち上がりが急であればあるほど K_I 値の初期応答は負になる。

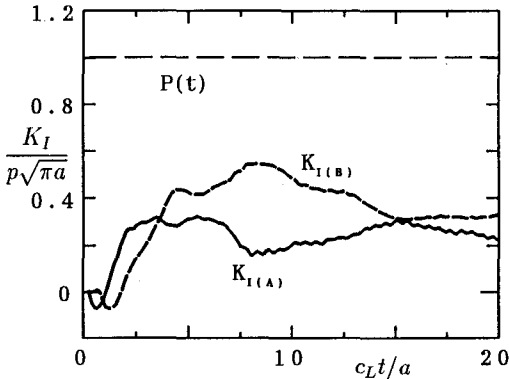


図2 $P(t)$ が時間に関係なく一定の場合

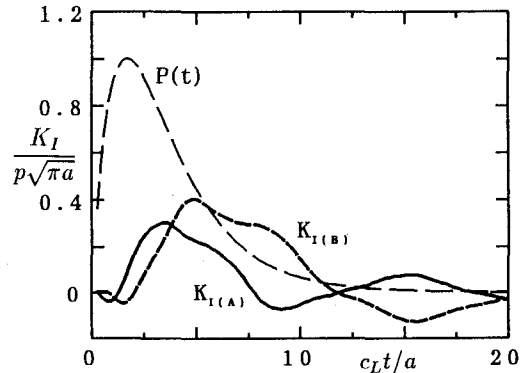


図3 $P(t)$ が急に立ち上がりすぐに減衰する場合

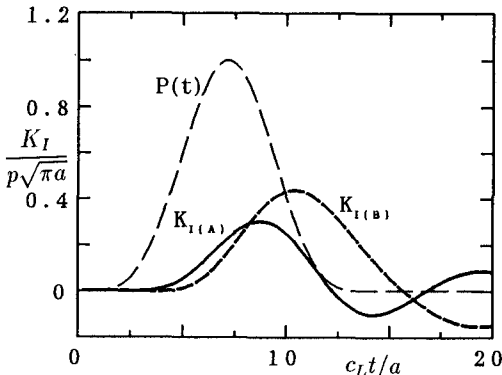


図4 $P(t)$ を sin 関数を用いて表した場合

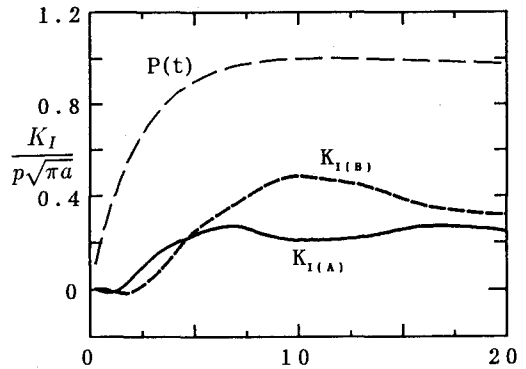


図5 $P(t)$ が最高圧に達してからゆっくり減衰する場合