

クラックによる波動散乱問題の解析

京都大学工学部 正会員 丹羽 義次
 京都大学工学部 正会員 廣瀬 杜一
 建設省 正会員 中谷 昌一

1. はじめに

一般に、土木構造物の破壊は最も苛酷な応力状態あるいはひずみ状態にある欠陥周辺上の点ないしは弱面上から生じるものと考えられる。従って、土木構造物にとってひび割れ切欠き等の存在は重要な欠陥と考えられ、この欠陥の検出のため超音波測定法やAE法等の非破壊検査法が開発実用化されている。本研究は、これら非破壊検査法の基礎的研究と位置づけられるクラックによる波動散乱問題を、平面応力状態を仮定し2次元面内問題として理論および実験の両面から解析を行なったものである。クラックの位置、傾斜角度、厚みをパラメータとし、これに平面波が入射した場合について理論的に境界要素法を用い数値計算を行ない各パラメータの自由表面上の変位に及ぼす影響を明らかにし、また一方アクリル板によりモデル供試体を作製し、AE計測装置を用い実験を行ない数値解析結果との比較検討を行なった。

2. 実験的解析

本実験では、厚さ5mmのPMA板および真鍮棒によりモデル供試体を作製した。Fig.1に示すように、クラックはモデル供試体の右側斜面近傍に存在する。真鍮棒左端に設置した変換子からファンクションジェネレータにより方形波電圧を入力し波動を発生させる。このとき、右側斜面の傾斜角度を調整することにより、自由表面である右側斜面に鉛直下方から平面P波が入射した場合を解析した。供試体内を伝播してきた波動は、右側斜面に設置した変換子によりある波形として検出される。使用した変換子は圧電素子AEセンサー（入力側905V、出力側905U）である。

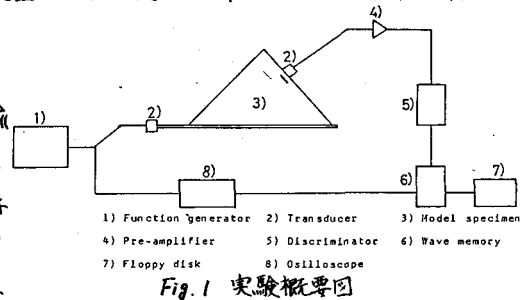


Fig. 1 実験概要図

3. 理論的解析

Fig.2に示すようにクラックがある有限な厚みを有する場合および、Fig.3に示すようにクラックが向いあった2面 ∂S_0^+ , ∂S_0^- で構成されると考えた場合について、境界条件; $t_i(x_0)=0$, $x_0 \in \partial S_0, \partial S_1$ を考慮して定式化を行なうとそれぞれ次のように積分表示される。

$$\frac{1}{2} u_i^T(x_0; w) = u_i^P(x_0; w) - \int_{\partial S_1^+} u_m^S(y; w) D_i^m(x_0, y; w) dS_y - \int_{\partial S_0^+} u_m^T(y; w) D_i^m(x_0, y; w) dS_y \quad (1)$$

$(x_0 \in \partial S_0)$

$$\frac{1}{2} u_i^S(x_0; w) = - \int_{\partial S_1^+} u_m^S(y; w) D_i^m(x_0, y; w) dS_y - \int_{\partial S_0^+} u_m^T(y; w) D_i^m(x_0, y; w) dS_y \quad (2)$$

$(x_0 \in \partial S_1)$

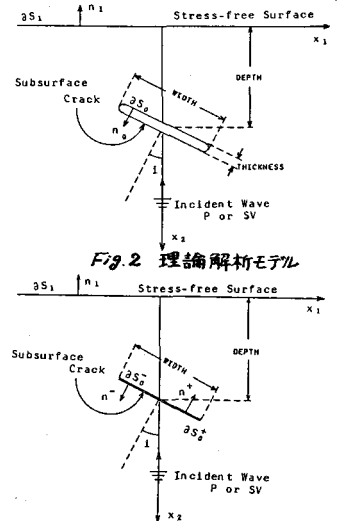


Fig. 2 理論解析モデル

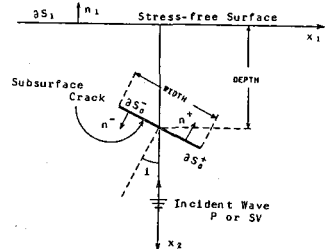


Fig. 3 理論解析モデル

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \pi_j^+ \cdot C_{ij,kl} \left\{ u_{k,l}^P(x_0, \omega) - \int_{\partial S_1^+} u_m^S(y, \omega) D_{k,l}^m(x_0, y, \omega) dS_y - Pf \int_{\partial S_0^+} \tilde{D}_{k,l}^m(x_0, y, \omega) \Delta u_m^T(y, \omega) dS_y \right\} \quad (x_0 \in \partial S_0^+) \quad (3) \\ \frac{1}{2} u_i^S(x_0, \omega) &= - \int_{\partial S_1^+} u_m^S(y, \omega) D_i^m(x_0, y, \omega) dS_y - \int_{\partial S_0^+} \tilde{D}_i^m(x_0, y, \omega) \Delta u_m^T(y, \omega) dS_y \quad (x_0 \in \partial S_1^+) \quad (4) \end{aligned} \right.$$

Δu_i^T はクラック面上の変位のくい違いを、 $Pf \int dS_y$ は発散積分の有限部分のみを考慮することを意味する。また u_k は変位を、 $D_{k,l}^m$ は二重層ポテンシャルを表わす。更に添字 T, S, P により全変位、クラックの影響による変位、入射波と反射波の知からなる変位を区別して表わした。ここで u_k^P については理論解が既知であり、従って式(1)(2)更に式(3)(4)を数値解析することにより u_k^S を求め u_k^P を加えることから自由表面上における全変位 u_k^T を求めることができる。

4. 実験解析結果および理論解析結果の関連性

実験の伝達経路は入力システム、モデル供試体、計測システムの3つから成るものと考えられ、それぞれの伝達関数を W_1, W_2, W_3 で表わす。2つの異なるモデル供試体 I および II に対し実験を行なうことを考え、このとき入力および計測システムが周波数領域の各成分に対し同一の特性を示すものと仮定できれば、実験解析結果 G^I, G^{II} の比をとることから次式

$$G^I(\omega) / G^{II}(\omega) = W_2^I(\omega) / W_2^{II}(\omega) \quad (\because W_1^I(\omega) = W_1^{II}(\omega), W_3^I(\omega) = W_3^{II}(\omega)) \quad (5)$$

が得られる。 W_2 にはモデル供試体内のクラックによる散乱、共振等が影響し、モデル供試体 I にクラックを有さないモデルを適用すれば式(5)よりクラックによる影響を検出できる。一方境界積分方程式により理論的に求めた全変位 u_2^T は、実験における伝達関数 W_2 と等しいことから式(5)より次式が得られ、これにより両解析の関連性が表わされたことになる。

$$u_2^T(\omega) / u_2^P(\omega) = G^I(\omega) / G^{II}(\omega) \quad (6)$$

5. 結果ならびに考察

まず波の伝播状況を Fig. 4 でみることにする。Fig. 4 におけるクラックは自由表面に平行であり、クラック幅の1/2の深さに位置している。解析地点5は x_1-x_2 座標の原点にあたり、この点の鉛直下方にクラック中央が位置し、入射したP波が直接到達せずクラックにおいて反射するため、波の到達時刻が遅くその到達した波の初期の振幅が小さくなっている。Fig. 5 は同じクラックに対する理論解析結果である。横軸には波数およびクラック中央深さの積である無次元量をとった。クラックの真上の解析地点4, 5, 6において低周波に対し非常に高い応答倍率がみられる。この現象はクラックの法線方向と入射波の入射方向とが一致するときに著しく大きく出現し、クラックが傾斜した角度をもつようになると急速に減少することがわかった。Fig. 6 は同じクラックに対する解析地点5における理論および実験解析結果を同時にプロットしたものである。Fig. 6 を見れば両解析結果が全周波数領域において同一の傾向を示しており、本実験による解析が妥当であることがわかる。

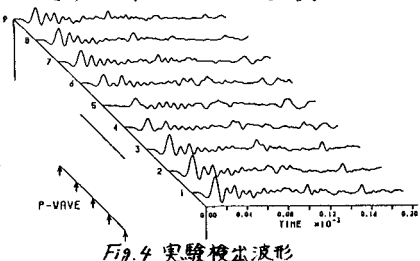


Fig. 4 実験検出波形

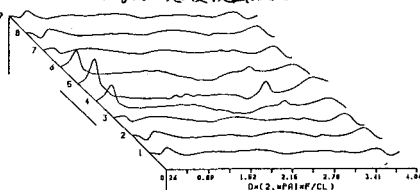


Fig. 5 理論解析結果 (応答倍率図)

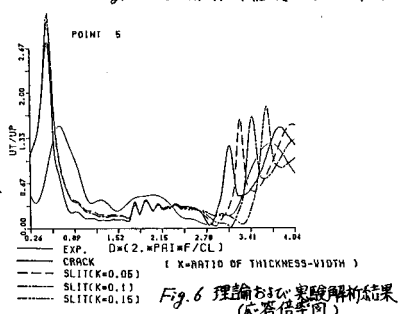


Fig. 6 理論および実験解析結果 (応答倍率図)