

コンクリート部材のひびわれ進展の診断について

熊本大学 工学部 正員 大津 政康

1. はじめに

アルカリ骨材反応を始めとして、コンクリートに発生するひびわれ(クラック)は、コンクリート構造物の耐久性に肉付きし、重大な問題となっている。そのため、クラックの発生、進展機構の解明ならびにその発生特性の決定、さらに存在するひびわれ性状の検討などが可能なひびわれ診断法の確立は、研究の急務であると考えられる。本研究は、このような背景のもとに、ひびわれ発生力学的条件としてコンクリートの破壊靱性を用い、ひびわれの検出にはアコースティック・エミッション(AE)法を、そして、ひびわれ性状および劣化度の評価には弾性波の伝播(フィルター)特性を用いた総合的なひびわれ診断法について提案したものである。

2. ひびわれの発生、進展と診断手法

ここで提案する手法は、図-1に示すような3つの項目に関するデータを用いて、ひびわれの診断を行うものである。まず、ひびわれが発生する際の力学的条件を検討する必要があり、これにはコンクリート材料の破壊靱性に関する情報が必要である。

次には、ひびわれ発生を検出、位置およびクラックの特性の決定が必要であり、そのためにAE法を適用する。さらに、既存のひびわれ性状を外部からの観測により検討する手法として、弾性波フィルター特性を用いる。

以上の項目におけるひびわれ診断への適用性についての検討が本研究の目的であるが、以下ではAE法によるひびわれ検出の有効性を数値実験により検討する。破壊靱性パラメータとして応力拡大係数を用いた研究と弾性波フィルター特性に関する研究については、別報を参照されたい。

3. 数値実験の概要

図-2に示すような内部に発生する引張りクラックを仮定し、それより発生すると考えられるAE波形をシミュレーション解析により求め、波形から逆にクラックの位置および方向を決定する可能性を検討した。引張りクラックのモデルは、深さ5cmの位置に発生した開口方向が、 $(\cos\theta\cos\phi, \cos\theta\sin\phi, \sin\theta)$ の引張り型の単位モデルである。このクラックにより発生するAE波形を表-1に示す表面上の9点で検出すると考えた。AE波形のシミュレーション解析の方法については、既報¹⁾を参照されたい。

表-1 変換子の座標

No.	(x_1, x_2) (m)
1	$(-0.05, 0.05)$
2	$(0.0, 0.05)$
3	$(0.05, 0.05)$
4	$(-0.05, 0.0)$
5	$(0.0, 0.0)$
6	$(0.05, 0.0)$
7	$(-0.05, -0.05)$
8	$(0.0, -0.05)$
9	$(0.05, -0.05)$

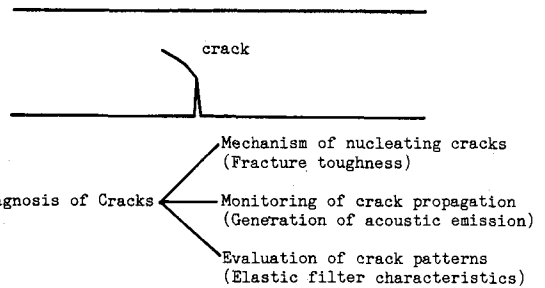


図-1 ひびわれ診断の手法

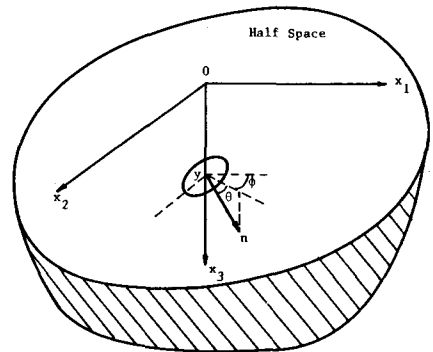


図-2 引張りクラックのモデル

解析波形の例として、 $\theta=10^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$ の場合に、表-1の検出点5および7で検出される変位波形を図-3に示す。これは、検出点に変位成分を検出するAE変換子を設置した場合に得られるAE波形に相当する。図より検出点5での波形は、P波の鋭いピークと負の小さな振幅のS波を持つことがわかる。一方、検出点7での波形

では、S波も鋭いピークを持ち、さらにSP波も観察される。このように検出点におけるAE波形は、クラックからの距離とクラックの方向に強く依存することになる。特に、SP波の存在に見られるように、P波以降の波形は非常に複雑に変化し、実際には反射波が存在することを考慮すれば、定量的な解析は非常に困難となることが予想される。そこでP波のみに着目することにした。

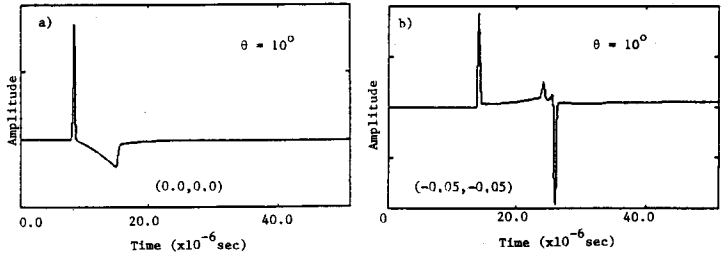
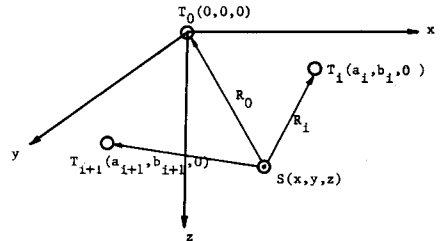


図-3 シミュレートされたAE波形の例

4. 解析手法および結果

①破壊源探索法： 図-4のような座標系で考えれば、クラック（AEの発生源）の位置（ x, y, z ）は、基準の変換子 T_0 と i 番目の変換子 T_i へのP波の到達時間差 t_i とP波速度 v_p により、次の方程式の解として求められる。



$$\sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = v_p t_i \quad (1)$$

式(1)は、非線形であるが平方し、例えば T_{i+1} に関する式との差を考慮することにより簡単に線形連立方程式とすることができる。ここでは、表-1に示すように9点で検出していることより、式(1)が8個得られ、7個の線形方程式から成る連立方程式の系が得られる。未知量は x, y, z の3個であるため、これに最小自乗法を適用し、クラックの位置を決定することにした。

図-4 破壊源探索の概要

②放射形式に基づいたクラックの方向決定： クラックにより発生したAE波動のP波の振幅値の空間的な分布は、地震学で知られている放射形式に従うことが認められている²⁾。引張りクラックの場合には、表面で観測される地表に垂直な方向のP波の振幅 u_3 は、式(2)に従うことになる。

ここで、 r はクラックから検出点への距離、 α_e はその方向余弦、 π_e は引張りクラックの開口方向、 ν はポアソン比、 A は定数である。式(2)より決定すべき量は、クラックの方向ベクトルあるいは $\pi = (\cos \theta \cos \phi, \cos \theta \sin \phi, \sin \theta)$ であることより方向角 (θ, ϕ) である。式(2)は、ところが π_e に関する2次式となっているため u_3 を与えても一意に π_e を決定することは、

$$u_3 = \frac{A}{r} \left[\frac{2\nu}{1-\nu} + 2(\alpha_e \pi_e)^2 \right] \cos \theta \quad (2)$$

不可能である。そこで、 (θ, ϕ) を2.5°ずつ変化させて、式(2)より u_3 の分布を求め、検出点で得られている u_3 の分布に最も一致する場合として (θ, ϕ) を決定することにした。

表-2 クラック方向の決定結果

Cases tested	Results obtained
(θ, ϕ)	(θ, ϕ)
(0.0, 0.0)	(0.0, 0.0)
(10.0, 0.0)	(10.0, 0.0)
(20.0, 0.0)	(20.0, 0.0)
(90.0, 90.0)	(90.0, 90.0)
(30.0, 0.0)	(32.5, 0.0)
(45.0, 0.0)	(50.0, 0.0)
(0.0, 15.0)	(0.0, 15.0)
(0.0, 45.0)	(0.0, 45.0)
(10.0, 15.0)	(10.0, 15.0)
(45.0, 45.0)	(50.0, 45.0)

破壊源探索を行った結果、数値実験で得られた波形から非常に精度良くクラックの位置が決定されることがわかった。表面からの計測では、精度が最も悪くなると言われている深さ方向が5.1cmと求められた以外は全く誤差はなかった。クラックの方向の結果は、表-2に示す。 $\theta = 30^\circ, 45^\circ$ の場合に少々誤差が見られるが、その他の場合は非常に高い精度で (θ, ϕ) が決定されており、本手法の有効性が確認されたと考えられる。その他の結果詳細については、当日発表を行う。

参考文献 1) M. Ohtsu and K. Ono, Journal of Acoustic Emission, 3, (1), 1984. 2) 大津政康, 材料, 32, (356), 1983.