

I-30

コンクリートの混合モード破壊

日本大学理工学部 正員 色部 誠
 日本大学理工学研究所 彭 松英
 日本大学大学院理工学研究科 伊藤 宏

I. まえがき コンクリートのモードII破壊ならびに混合モード破壊が注目されるようになったのは、Arrer と Ingraffea がコンクリートにはせん断モード破壊は起こり得ないと述べた報告[1]に対し、1986年 Bažant が批判論文[2]を発表したことに始まる。以来、関係論文は数多く発表されているが、いまだに決着はついていない。例えば、Rots は最近の彼の論文[3]において、コンクリートにモードII破壊や混合モード破壊があり得るか否かは疑問のままであるとして、これらの破壊力学用語をコンクリートに積極的に使用するのにきわめて慎重な表現を行っている。コンクリートのモードI破壊の研究に、ノッチ付き円柱を利用した例[4]はいくつかあるが、モードII破壊の研究に用いたという例はほとんど無い。本報告には、割裂荷重の作用を受けるノッチ付きコンクリート円形厚板のノッチ先端に生じる応力状態を利用して、コンクリートに混合モード破壊を生ぜしめようとの意図のもとに行った解析と実験の結果を示す。

II. ノッチ付き円板の応力拡大係数

中心部に対称にノッチを有する円形厚板にノッチ平

面に斜交して作用する
 割裂荷重により生ずる
 応力状態・変形状態は
 Fig.1 の右側に示す二
 つの円板の解の重ね合
 わせによって得られる。
 割裂荷重による完全な
 円板の解はただちに求

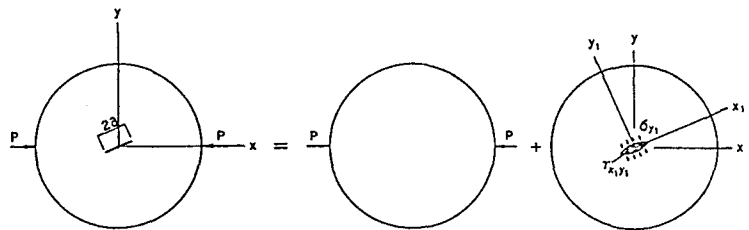


Fig.1 Decomposition for Solving a Notched Disk.

まる。これが重ね合わせに必要な第一の解である。これよりノッチ位置に生ずる垂直応力 σ_{y_1} およびせん断応力 $\tau_{x_1y_1}$ は次式のように導かれる。

$$\sigma_{y_1} = \frac{P}{\pi R} \left[\frac{2(1+2\rho^2)(\cos 2\alpha - 1) - 2\rho^4(\cos 2\alpha - 1)(2\cos 2\alpha + 1)}{(1-2\rho^2\cos 2\alpha + \rho^4)^2} + 1 \right] \quad (1a)$$

$$\tau_{x_1y_1} = \frac{P}{\pi R} \frac{2(1-\rho^2)(1-\rho^4)\sin 2\alpha}{(1-2\rho^2\cos 2\alpha + \rho^4)^2} \quad (1b)$$

これらの応力を右端の図に見られるように円板のノッチ内面相当部に符号を転じて作用させて得られる第二の解を先の第一の解に重ねるのである。中央の完全円板の解は左側の円板のノッチに対する応力拡大係数に無関係である。すなわち、この応力拡大係数は右端の円板の応力拡大係数によって定まる。ノッチの長さ $2a$ が円板の直径 D に比べて十分小さければ、右端円板の応力拡大係数は無限板内の長さ $2a$ のクラック内面に同様の力が加わる場合の応力拡大係数によって近似できる。クラック内面の作用力による無限板の応力拡大係数は次式により定まる。

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_a^\infty -\sigma_{y_1} \sqrt{\frac{a+X_1}{a-X_1}} dX_1 \quad (2a)$$

$$K_{II} = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_a^\infty -\tau_{x_1y_1} \sqrt{\frac{a+X_1}{a-X_1}} dX_1 \quad (2b)$$

以上のようにして導かれる解は弾性理論解が利用されているが、境界条件を正しく満足していないという点で、厳密なものではない。

有限要素法によれば、数値計算による計算誤

差はまぬかれないが、境界条件を乱すことなく解を得ることができる。ここでは、割裂荷重をFig.2のように対称成分と逆対称成分に分けて、対称問題の解と逆対称問題の解を重ね合わせて所要の解とした。得られたノッチ表面上の節点変位からIngraffeaの提案式とより高次の項まで含めた修正式とによって応力拡大係数求めた。Fig.3に以上三つの方法による応力拡大係数を無次元化して示す。

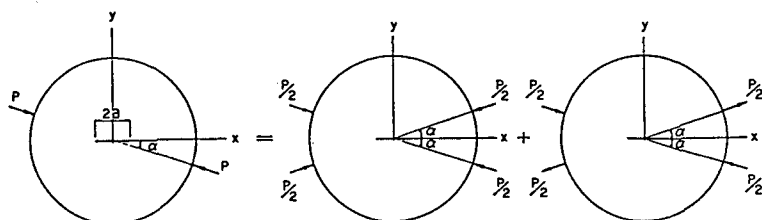


Fig.2 Decomposition of Loading into two Systems.

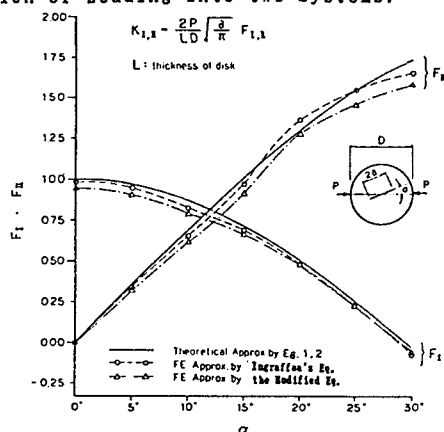


Fig.3 Normalized Stress Intensity.

Ⅲ. 実験結果

供試体は標準圧縮試験片用のモールドを用いて作製した。粗骨材の最大粒径は15mmであった。試験実施直前に厚さ6cmに切断し、供試体の成形を行った。ノッチの長さは16mmである。コンクリートの弾性係数は330,000 kgf/cm²、またシリンダー強度は304 kgf/cm²であった。割裂に先だち供試体には破壊荷重の1/3の予備荷重を加えた。荷重方向とノッチ平面のなす角 α にかかわらず、破壊荷重のほぼ1/2の荷重点で荷重対ひずみ曲線に変曲点を生じた。この点をもって初期破壊点、いわゆるひび割れ開始点とした。 α が0°のときのひび割れ開始荷重は1.33tf、 α が25°ないし30°のときのそれは1.5tfであった。Fig.3を参照してこれより試験コンクリートのモードIおよびモードIIの初期破壊靱性として $K_{Ic} = 14.9 \text{ kgf/cm}^{1.5}$ 、 $K_{IIc} = 29.4 \text{ kgf/cm}^{1.5}$ が得られる。 $\sigma_{\theta \max}$ 理論、 $G_{\max}$ 理論、 $S_{\min}$ 理論から得られる K_{Ic}/K_{IIc} の値はすべて1以下であるのに対し、本実験で得られた値はほぼ2であって、違いは著しい。ひび割れ進行方向についても、これらの理論と比較して、興味ある結果が得られている。詳細は講演の際に口頭にて報告する。

参考文献

1. Arrer M. and Ingraffea A.R., Mixed-Mode Crack Propagation in Mortar and Concrete, Dept. Str. Engrg., Cornell University, Report No. 81-13, 1982.
2. Bažant Z.P. and Pfeiffer P.A., Shear Fracture Tests of Concrete, Matériaux et Construction, Vol. 19, No. 110 (RILEM, Paris), 1986.
3. Rots J.G., Stress Rotation and Stress Locking in Smeared Analysis of Separation, Intern. Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy, Tohoku University, Sendai, Japan, 1988.
4. Ojdovic R.P. and Petroski H.J., Fracture Behavior of Notched Concrete Cylinder, J. Engrg. Mech., ASCE, Vol. 113, No. 10, Oct., 1987.