

73. コンクリートの破壊靱性に関する研究

東京大学 岸谷孝一 村上 聖
大分大学 平居孝之

1. はじめに

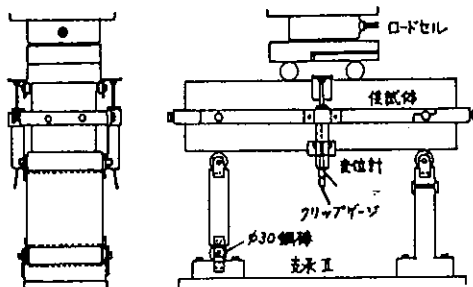
コンクリートの破壊靱性評価として直接及び間接的方法が試みられている。直接法として、荷重-変位曲線から実験的に得られる破壊エネルギーをひび割れ進展量と関係付ける方法が代表的である^{1),2)}。間接法は、破壊モデルによる解析から間接的に破壊靱性を評価するものである^{3),4)}。従来、コンクリートへの線形破壊力学(LEFM)の適用性が議論されてきたが、主ひび割れ進展に先行して生じるマイクロクラック域寸法がコンクリートにおいて一般に無視し得ない大きさであることから、その適用性は供試体寸法に強く依存することが認められている⁵⁾。コンクリートの破壊特性のLEFMからの逸脱は、マイクロクラック域が依然として耐荷力を有することに起因しているために、それを考慮に入れたモデルの仮定が必要である。コンクリートの引張破壊の特徴から、主ひび割れ方向への幅の狭いマイクロクラック域の進展を仮定し、それを仮想き裂面に結合力が作用するモデルで近似した結合力モデルの適用性が高いと考えられる。そこで、本稿は結合力モデルのコンクリートへの適用性を仮定し、コンクリートの破壊靱性の間接評価を目的とする。

2. 実験方法

切欠き曲げ供試体による破壊靱性試験における支承部拘束の影響を実験的に検討した。それは、試験条件の影響のうち支承拘束が、境界条件として解析的に定量化し難い外部因子のためである。

試験は、幅1mmの切欠き(アクリル板)を先打ちした角柱供試体(寸法10×10×40cm)の3等分点曲げ载荷(スパン・高さ比=3.0)で行った。相対切欠き深さは、無切欠き、0.1、0.3、0.5の4水準とした。測定対象は、曲げ荷重(ロードセル)、中央点たわみ(カンチレバ型変位計)、き裂口変位(クリップ型変位計)であり、それ

図1 測定方法



らはX-Yレコーダによって自動記録した。測定方法は図1に示す通りで、供試体は材令28日で湿潤状態で試験を行った。また、载荷速度は約5 kgf/secに一定とした。用いた支承構造は、通常のローラー支承(支承Ⅰ)と、片方の支承脚底部に鋼棒を挿入し支承部の水平移動拘束を低減した構造(支承Ⅱ、図1参照)の2種類である。表1及び2には、使用材料及び調合をそれぞれ示す。

表1 使用材料

セメント	普通ポルトランド
細骨材	大井川産川砂
	表乾比重 2.62
	FM 2.85
	最大寸法 5.0 mm
粗骨材	大井川産川砂利
	表乾比重 2.65
	FM 6.50
	最大寸法 15.0 mm

表2 使用調合

アレン モルタル	W/C = 50%
	砂体積率 = 0.5
	S/C = 2.14
アレン コンクリート	W/C = 50%
	砂体積率 = 0.3
	石体積率 = 0.4
	S/a = 42.9%
	(C:S:G(骨量比)) = 1:2.14:2.89
slump = 13.2cm	

3. 実験結果

図2に、支承Ⅰ及びⅡを用いたアレンコンクリートの荷重-たわみ曲線を示す。相対切欠き深さ0.5の場合については、繰返し载荷曲線の包絡線を示している。図3は、アレンモルタル及びコンクリートに関する最大耐力点での中央たわみ及びき裂口変位の測定値に及ぼす支承拘束の影響を示す。これらの図から、相対切欠き深さが大きくなる程、また靱性の大きい材料ほど支承ⅠとⅡによる結果の差が大きくなっており、支承ⅠでⅡによるよりも限界たわみ及びき裂口変位ともに大きく測定されることが分る。そこで、以下の考察では、支承拘束のより小さいと考えられる支承Ⅱによる実験結果をもとに、コンクリートの間接的破壊靱性評価を行う。

図2 荷重-中央たわみ曲線

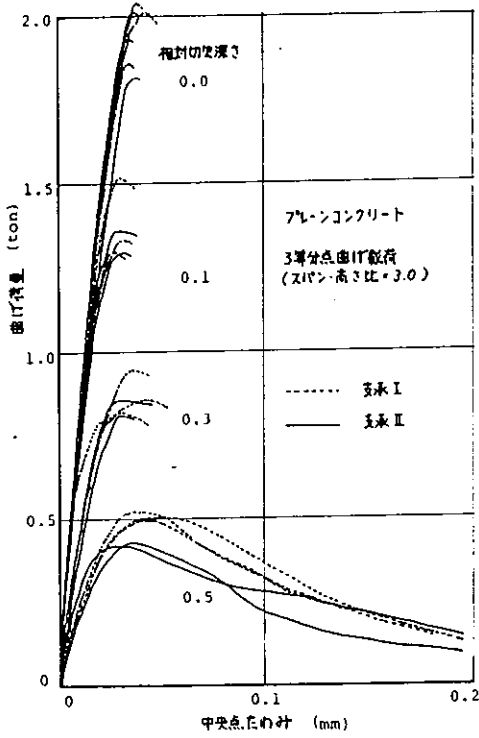


図3 限界たわみ、き裂口変位に及ぼす 支承拘束の影響

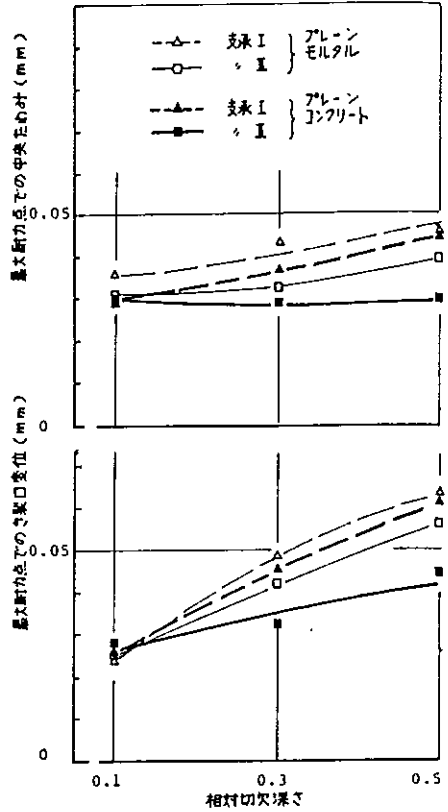


表3 破壊靱性の間接評価結果

鋼合	σ_{t1} (kgf/cm^2)	E (kgf/cm^2)	K_{IC} ($\text{kgf/cm}^{3/2}$)		CTOD (mm)
			LEFM ²⁾	結合力モデル ³⁾	
アレーンモルタル	39.0	2.55×10^4	71.0	79.7	6.43×10^{-2}
アレーンコンクリート	34.9	3.27×10^4	80.1	99.5	8.75×10^{-2}

- 1) 割裂引張強度 ($\phi 10 \times 20 \text{cm}$ リンダ- 径試験 3 個の平均値)
- 2) 荷重-き裂口変位曲線の初期勾配から算出された値の平均値
- 3)

a/w	3等分点割げ (スパン-高さ比=3.0) $Y = K_I / \sigma_b \sqrt{a}$
0.1	1.946
0.2	1.921
0.3	2.036
0.4	2.258
0.5	2.664

- 4) $K_{IC} = \sigma_t \sqrt{X \cdot w}$, $X = (E \cdot \text{CTOD}) / (\sigma_t \cdot w)$

a/w	w/w	σ_b / σ_t	$X = (E \cdot \text{CTOD}) / (\sigma_t \cdot w)$
0.1	0.1	0.73	0.24
	0.2	0.99	0.57
	0.3	1.21	1.10
	0.4	1.42	1.99
0.3	0.1	0.46	0.29
	0.2	0.66	0.77
	0.3	0.84	1.61
	0.4	1.01	3.23
0.5	0.1	0.28	0.32
	0.2	0.42	1.02
	0.3	0.53	2.67

図4 荷重-き裂口変位曲線

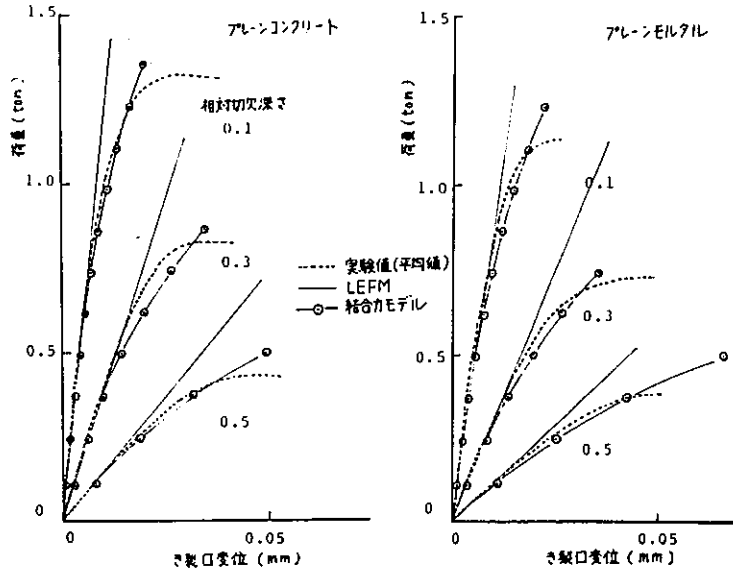
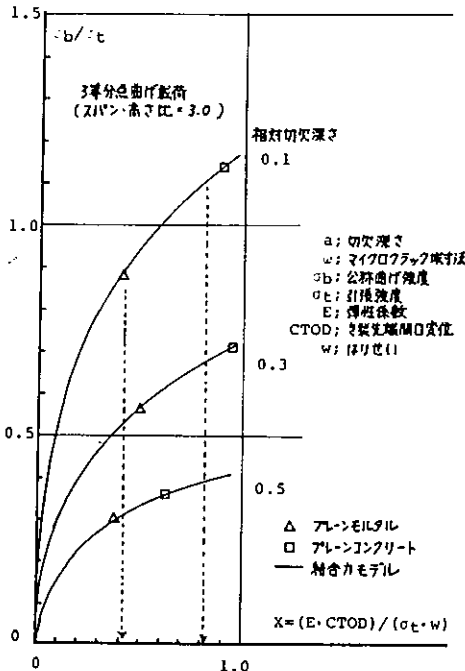


図5 破壊靱性の間接評価法



4. 考察

前述のように、コンクリートの破壊モデルとして結合カモデルを考える。マイクロクラック域を仮想き裂面に一様な引張強度が作用するモデルで近似し、仮想き裂先端でもはや応力の特異性を生じない条件（応力の連続条件）を考慮すれば、引張曲げ強度比、マイクロクラック

域寸法、き裂開口変位の間に唯一の関係が得られる。結合カモデルのコンクリートへの適用性を検討するために、図4に荷重-き裂口変位曲線について実験値と解析値の比較を示す。ここで、各材料の弾性係数は、各切欠き深さについて実験曲線の初期勾配から解析的に得られた値の平均値から求めた。この図から、実験曲線において最大耐力点近傍で大きな曲率を示し解析曲線との間に差を生じているが、簡単な仮定に基づく結合カモデルが材料非線形性を良く表現しているように思われる。そこで、図5において結合カモデルによる破壊靱性パラメータの間接評価を行った。

破壊靱性パラメータとして、限界応力拡大係数 K_{Ic} と限界き裂先端開口変位 CTOD について検討した。LEFM に基づく K_{Ic} は、間接境界要素法（線形重み荷重）を用いた J 積分法による解析値から⁷⁾、結合カモデルに基づく K_{Ic} は、実験的に得られた引張曲げ強度比から $X = (E \cdot CTOD) / (\sigma_t \cdot W)$ (E : 弾性係数, σ_t : 引張強度, W : はりせい) を解析的に推定し、次式

$$K_{Ic} = \sqrt{E \cdot J} = \sqrt{X \cdot W}$$

($J = \sigma_t \cdot CTOD$; J 積分値)

によりそれぞれ求めた。また、限界 CTOD は、 X の推定値に弾性係数 E 、引張強度 σ_t 、及びはりせい W を代入し求められる。その結果を表3に示す。

より脆性的なプレ-モルタルにおいて LEFM 及び結合カモデルによる結果の差は小さい（約1割）が、プレ-コンクリートにおいて LEFM による結果は、結合カモデルによる結果に比べて破壊靱性を過小評価しているように思われ、その差は約3割程であった。また、繊維体積率 1.0% の SFRC について同様に LEFM 及

び結合力モデルを適用して得られた破壊靱性値の差は約10割程であり(ただし、SFRCにおいてひび割れ開始点の検出が難しく最大耐力点で評価したことに破壊靱性評価の意味で若干の問題点があり、本稿では参考までにとどめることにした)、このことから、より靱性の大きい材料では小型供試体を用いたLEFMによる破壊靱性評価がより過小な結果をもたらすことが予想され、このことは既往の文献においても指摘されている⁸⁾。

5. まとめ

本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 切欠き曲げ破壊試験における支承部拘束の影響は相対切欠深さが大きくなる程、また靱性の大きい材料ほど無視し得ない重要な因子となり、拘束が大きくなる程見掛上、破壊靱性は高く評価されるように思われる。
- (2) 小型供試体を用いた線形破壊力学による破壊靱性評価は、靱性の大きい材料ほど過小な結果をもたらすことが予想され、これはコンクリートにおいてマイクロクラック域寸法が一般に無視し得ない大きさであるところから、き裂先端の非線形性を考慮に入れた評価が必要である。
- (3) (2)に関連し、簡単な仮定に基づく結合力モデルが材料非線形性を良く表現することが、荷重-き裂口変位曲線に関する実験値との比較から確かめられ、それによるコンクリートの破壊靱性の間接的評価は本実験の範囲内では適当のように考えられた。しかし、さらに広範囲の調査について実験的検討を加える必要がある。
- (4) 材料開発の立場上、結合力モデルから得られた知

見から靱性材料を定義すれば、引張強度及び引張曲げ強度比がともに大きい材料ほど(破壊)靱性の大きな材料と言える。この概念に適合する材料としてSFRCが挙げられるが、(2)に関連し線形破壊力学では妥当な破壊靱性評価を行うことができないものと考えられる。

文 献

- 1) 岡田, 小柳, 大野, コンクリートの曲げ引張破壊過程に関するエネルギー的考察, 土木学会論文報告集 第285号, 1979.5
- 2) P.E.Petersson, Fracture Energy of Concrete; Method of Determination, Practical Performance and Experimental Results. Cement and Concrete Research, Vol.10, 1980
- 3) Z.P.Bazant, Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Materials and Structures (RILEM), Vol.16, No.93, 1983
- 4) A.Carpinteri, Plastic Flow Collapse vs. Separation Collapse (Fracture) in Elastic-Plastic Strain-Hardening Structures, Materials and Structures (RILEM), Vol.16, No.92, 1983
- 5) ACI 224 委員会, コンクリート構造物におけるひび割れの制御, コンクリート工学 Vol.19, No.9, Sept. 1981, 沢小柳, 中西他
- 6) 岸谷, 平居, 村上, コンクリートの各種強度試験法に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1983.7
- 7) K.Kishitani, T.Hirai, K.Murakami, J-Integral Method in Analysis of Stress Intensity Factor Using Boundary Elements, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B), Vol.37, No.3, 1984
- 8) 大野, C.E.Kesler, F.V.Lawrence, J積分によるコンクリートの破壊靱性の評価, 第2回コンクリート工学年次講演論文集, 1980