

## 論文 回転ひび割れモデルによる RC 梁のせん断挙動解析

山谷 敦<sup>\*1</sup>・中村 光<sup>\*2</sup>・飯塚敬一<sup>\*1</sup>・檜貝 勇<sup>\*3</sup>

**要旨:** 鉄筋コンクリート梁のせん断耐荷力および耐荷機構には、種々の影響因子が含まれ、しかも、その機構が複雑であるため、せん断挙動を精度良く把えるには、適切な材料特性およびひび割れモデルを用いることが重要となる。本研究では、非線形有限要素法により RC 梁のせん断挙動解析を行い、破壊エネルギーを考慮したコンクリートの引張軟化特性および回転ひび割れモデルを用いることにより、せん断耐荷機構を精度良く評価できることを示した。

**キーワード:** RC 梁、せん断耐荷機構、回転ひび割れモデル、引張軟化特性

## 1. まえがき

せん断破壊は RC 構造物の代表的な破壊形態の一つであるが、せん断破壊に至る耐荷機構は極めて複雑であり、多くの要因に影響されるため、せん断耐力の的確な評価を困難にしている。せん断破壊を解析的に把える場合、固定ひび割れモデルを用い、ひび割れたコンクリートの特性として、ひび割れせん断伝達と引張剛性を考慮した解析では、せん断破壊、特に斜め引張破壊を十分に表現し得ないことが知られている。この原因としては、例えば、コンクリートのひび割れせん断伝達機構は複雑であり、せん断特性を適切にモデル化することが困難であること、あるいは、引張剛性モデルがひび割れの分散性を前提として成り立つモデルであること等が挙げられる。このような問題に対しては、無筋コンクリートの終局挙動解析でその有効性が確認されている回転ひび割れモデル [1] を用いることや、さらに、一本ないし少数本のひび割れによって破壊挙動が決定される斜め引張破壊では、コンクリートの構成則を応力-ひび割れ幅関係（引張軟化特性）により表現することで改善されると考えられる。そこで、本研究では、固定ひび割れモデルおよび回転ひび割れモデルに破壊エネルギーに基づく引張軟化特性を考慮して、RC 梁のせん断挙動の解析的検討を行い、従来のモデルでは解析が困難であったせん断破壊の評価を試みた。

## 2. 解析概要

## (1) 解析モデルおよび解析条件

本解析に用いた RC 梁は図-1に示す2つのモデルであり、スパンはモデル A が 2.0m, モデル B が 1.0m, 梁高はともに 30cm である。荷重はスパン中央に集中荷重を幅 8.0cm の載荷板により載荷している。せん断スパン比 ( $a/d$ ) はモデル A が  $a/d=3.8$ , モデル B が  $a/d=1.9$  であり、それぞれせん断破壊モードとして斜め引張破壊とせん断圧縮破壊になるように設計した。モデル A の解析モデルを図-2に示すが、要素寸法の影響を検討するため、断面方向に 9 分割 (A-1) と 7 分割 (A-2) の 2 つのモデルを設定した。解析モデルは対称性を考慮して 1/2 モデルとし、非線形求解法は最大耐荷力以降の軟化挙動を把えるため、変位制御型の増分解析とし、Newton-Raphson 法により収束計算を行った。

\*1 東電設計 (株) 技術開発本部耐震技術部 (正会員)

\*2 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科、工博 (正会員)

\*3 山梨大学教授 工学部土木環境工学科、工博 (正会員)

(2) 材料モデルおよびひび割れモデル

解析に用いた材料諸元を表-1に示すが、これらの値は解析に先立って実施したせん断実験の供試体の諸元である。ひび割れ前のコンクリートは Darwin-Pecknold [2] の直交異方性モデルとし、ひび割れ後は固定ひび割れモデルおよび回転ひび割れモデルとした。コンクリートの応力-ひずみ関係を図-3に示すが、このうち、引張応力域については、引張強度 (f<sub>t</sub>) までは一定の傾きで応力が増加するモデルであり、それ以降は引張軟化特性として-3乗モデル [3] を用いた。引張軟化特性における破壊エネルギーは0.15Kgf/cmとした。また、圧縮、引張とも原点指向型の除荷経路を考慮した。

引張軟化特性は応力-ひび割れ幅の関係で与えられるため、分布ひび割れモデルでは、ひび割れ幅 (W) を、等価長さ (ℓ) を考慮してひずみ量 (ε) に変換する必要がある。本解析では、ℓ を要素短辺の長さとしたケースと、ℓ を要素の対角線の長さとしたケースで行っている。これは、前者は荷重-変位関係において最も硬い結果を示し、後者は最も軟らかい結果を示すものと考えられるためであり、例えば、Dahlblomらの論文や内田らの解析 [4] で用いられている '要素のひび割れ方向の投影長さ (等価長さ)' のような考え方に基づく結果は上下限を考慮した本解析結果の中間に入ることになる。

固定ひび割れモデルのせん断剛性は山田・青柳のモデルを、鉄筋の応力-ひずみ関係は降伏点以降の勾配を零とした完全弾塑性モデルを用いた。

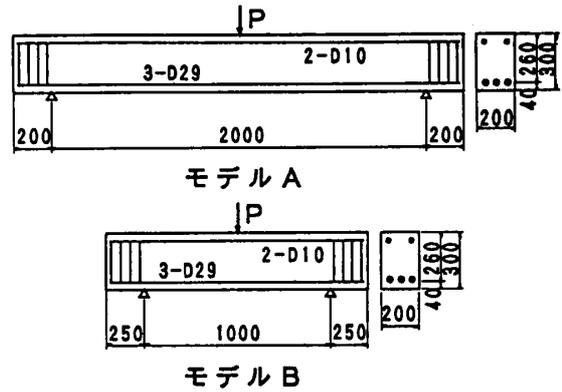
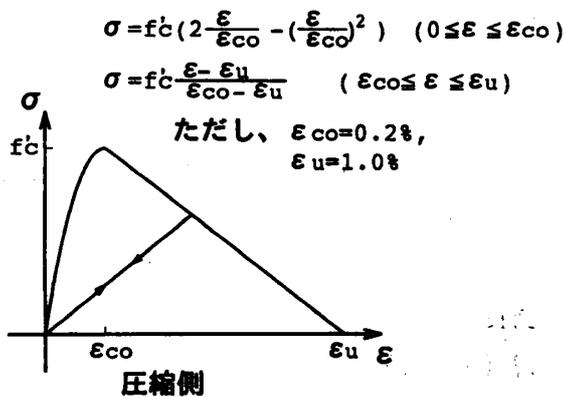


図-1 解析に用いた RC 梁

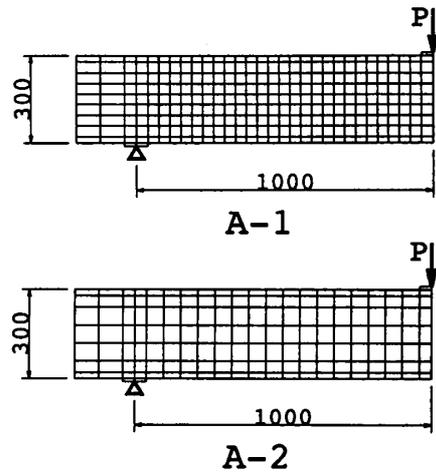


図-2 モデルAの解析モデル

表-1 材料諸元

		モデルA	モデルB
コンクリート	圧縮強度 f' <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	231	234
	引張強度 f <sub>t</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	23	24
	初期ヤング係数 E <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	2.46 × 10 <sup>5</sup>	2.48 × 10 <sup>5</sup>
鉄筋	初期ヤング係数 E <sub>s</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.86 × 10 <sup>5</sup> (D29)	
	降伏強度 f <sub>y</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	3645 (D29)	
その他	引張鉄筋比 P (%)	3.7	
	載荷板、支圧板の幅 (cm)	8.0	

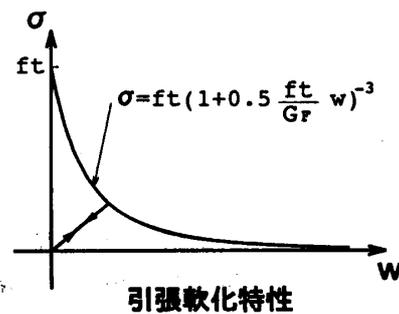


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

### 3. 斜め引張破壊するRC梁のせん断挙動（せん断スパンが長い梁）

回転ひび割れモデルおよび固定ひび割れモデルにより解析したモデルA ( $a/d=3.8$ ) の荷重変位関係を図-4および図-5に示す。図中実線が実験結果であり破線が要素分割を細かくしたモデル(A-1)の、一点鎖線が要素分割を粗くしたモデル(A-2)の解析結果である。実験結果は、変位 $\delta$ がおよそ0.32cmを越えたあたりで、斜め引張ひび割れにより最初の荷重低下が生じ、それ以降徐々に耐力が回復して、 $\delta=0.54$ cm付近で第二のピークを迎えてから荷重が再び低下していく性状を示した。これは、実験供試体が $a/d=3.8$ とやや小さいため、典型的な斜め引張破壊とはならず、斜め引張ひび割れ発生後に耐荷機構がアーチ機構に移行したため、荷重-変位関係に2つのピークが現れたものと考えられる。

図-4に示す回転ひび割れモデルによる荷重-変位関係では、実験と解析は最大荷重点まではよく一致しており、最大耐荷力も実験値の $P_{max}=14.7$ tfに対し解析値は $P_{max}=12.2\sim 14.6$ tf(83~99%)の範囲にあり、比較的よい精度で求められている。また、要素分割の影響について見ると、細かいモデル(A-1)と粗いモデル(A-2)の結果は比較的よく一致しており、引張側の構成則に破壊エネルギーを導入することで要素寸法依存性はかなり解消されていると考えられる。一方図-5に示す固定ひび割れモデルの荷重-変位関係では、実験の最大荷重点あたりから、解析値と実験値は大きな差異を示しており、最大耐荷力も解析値が実験値に比して約31~47%程度大きくなっている。また、固定ひび割れモデルでは、要素分割の影響が顕著に現れており、要素分割が粗いモデル(A-2)の方が細かいモデル(A-1)に比べて約11%程度耐力が増加している。この結果はせん断特性に要素寸法依存性が含まれているためと考えられる。従って、固定ひび割れモデルでは、引張軟化特性に破壊エネルギーを考慮しても要素寸法依存性を回避することが難しく、これを回避するためには、せん断伝達特性に対しても破壊エネルギー的概念を導入する必要があることを示唆するものと言える。

次に、二つのひび割れモデルにより得られたひび割れ図を図-6および図-7に示す。これらの図は、細かい要素モデル(A-1)で等価長さを要素対角線とした場合の結果である。図-6に示す回転ひび割れモデルにより得られたひび割れ状況には、実験よりも載荷点に近い位置で斜め引張ひび割れに相当するひずみの局所化が見られ、それが支点に向かって軸方向鉄筋に沿って進展していることが分かる。この解析において水平にひび割れが集中する箇所は軸方向鉄筋の内側の要素であり、概念的には鉄筋の有無による剛性のコントラストが大きい位置で、ひび割れがせん断力の小さい軸方向に向かって回転することにより、ひずみの局所化が起きたものと考えられる。解析よ

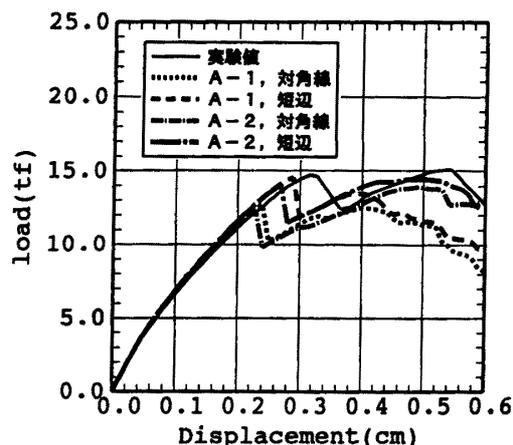


図-4 回転ひび割れモデルによる荷重-変位関係 (モデルA)

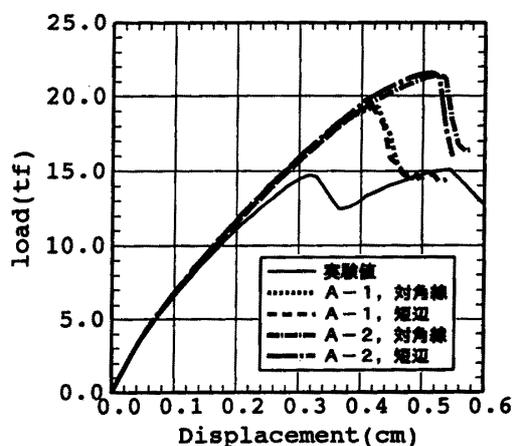


図-5 固定ひび割れモデルによる荷重-変位関係 (モデルA)

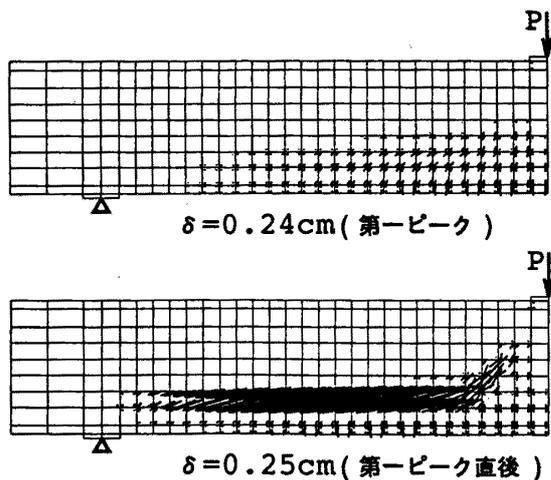


図-6 回転ひび割れモデルによるひび割れ図 (モデルA)

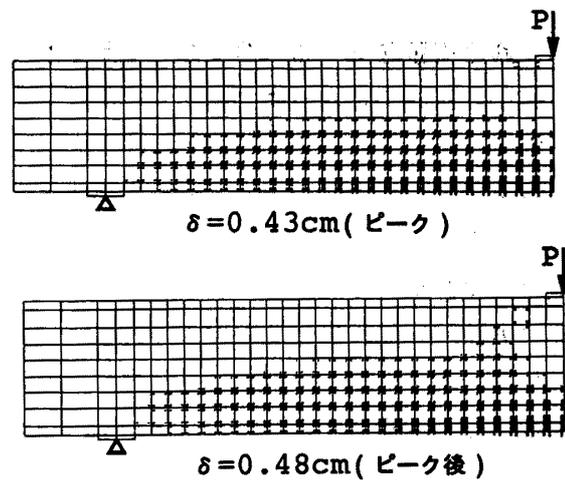


図-7 固定ひび割れモデルによるひび割れ図 (モデルA)

り得られた斜めひび割れは、図-8に示す①の曲げひび割れが斜めひび割れに進展したものを模擬していると思われる。このことは、回転ひび割れモデルでは、先に局所化したひび割れの挙動が卓越する傾向を示し、実験に見られるような②の第二ひび割れの発生を表現することが困難であることを示唆している。従って、今回行った回転ひび割れモデルによる解析では、マクロな情報としての耐荷力は精度良く表現できても、ひび割れ状況は必ずしも実験値と一致しない結果となった。一方、

固定ひび割れモデルでは、図-7に示すひび割れ図を見て分かるように、ひび割れの局所化現象は生じず、ひび割れが分散した挙動を示している。従って、今回使用した構成則では、固定ひび割れモデルによって実験のせん断耐荷力並びにひび割れ状況を正確に評価できないことが分かる。

荷重-変位関係で記したように、二つの荷重のピークが発生する原因としては、斜め引張ひび割れ発生以降、耐荷機構がアーチ機構に変化したためと考えられるが、その耐荷機構の変化は図-9に示す回転ひび割れモデルでの  $\delta = 0.24 \sim 0.6 \text{ cm}$  の主圧縮応力増分図の遷移からも確認された。すなわち、斜めひび割れ発生後、主圧縮応力の流れが大きく変換し、アーチ的な流れを示していることが分かる ( $\delta = 0.25 \sim 0.40 \text{ cm}$ )。また、解析で得られた第二のピークは、このアーチ機構がクラウン部コンクリートの圧壊によって崩壊する時点に対応しており、この挙動も実験結果と一致するものである ( $\delta = 0.40 \sim 0.60 \text{ cm}$ )。

本解析では、コンクリートの引張軟化特性を用いているため、ひび割れ幅をひずみ量に変換するための等価長さ ( $l$ ) の評価が重要となる。ここでは、 $l$  を要素の対角線としたケースと、短辺としたケースを採用したが、これは例えば、要素形状が正方形の場合には、両者の長さの比は 1.41 であることから、応力-ひび割れ幅関係において、等価長さ ( $l$ ) を 1.41 倍にするということは破壊エネルギーを  $1/1.41$  にしたことと等価になる。今回の検討では、回転ひび割れモデルにおいて、その等価長さの違いが解析結果に及ぼす影響は比較的大きく、等価長さの影響を要素形状によらず反映できるような手法が要素寸法依存性をより低減させるために必要と思われる。

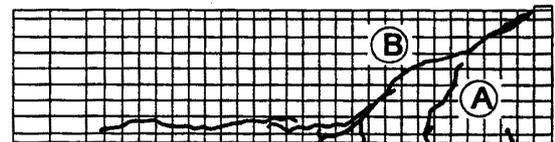


図-8 モデルAの実験結果

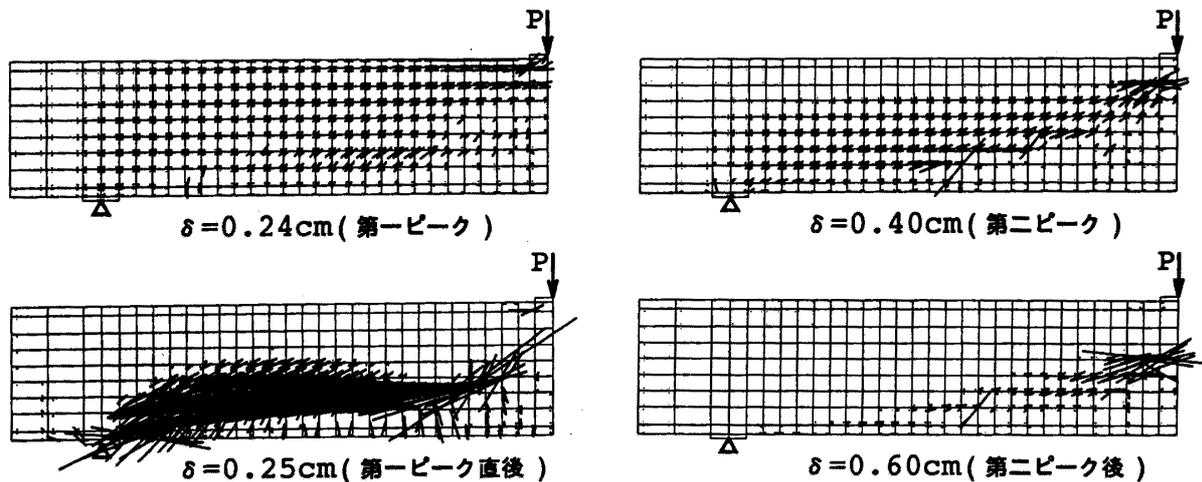


図-9 主圧縮応力増分図

4. せん断圧縮破壊するRC梁のせん断挙動 (せん断スパンが短い梁)

回転ひび割れモデルおよび固定ひび割れモデルにより解析したモデルB ( $a/d=1.9$ ) の荷重変位関係を図-10および図-11に示す。実験結果 (図中実線) は荷重Pが約17.5tあたりで斜め引張りひび割れが生じて耐荷機構がアーチ機構となり、その後、最大荷重点  $P_{max}=33.2t$  で荷重点近傍のコンクリートが圧壊する典型的なせん断圧縮破壊となっている。回転ひび割れおよび固定ひび割れモデルとも、斜めひび割れ発生後は、実験結果に対してやや硬めの挙動を示している。しかしながら、回転ひび割れモデルでは、斜めひび割れ発生後急激に剛性が低下する実験値の傾向は概ね把握されている。また、最大荷重点は解析結果が  $P_{max}=27.3\sim 31.5t$  となり、実験値  $P_{max}=33.2t$  に比してやや小さめの耐力 (82~95%) となる。ただし、二羽のディープビーム式 [5] から求められるせん断耐力は  $P=26.4t$  であり、これは回転ひび割れモデルの解析結果の下限値とほぼ一致している。それに対して、固定ひび割れモデルでは、最大耐力は実験値と比較的一致しているが、斜めひび割れ発生による明確な挙動の変化を表していないことが分かる。

要素分割の影響について見ると、二つのひび割れモデルとも最大荷重点付近では、要素分割の細かいモデル(B-1)の方が粗いモデル(B-2)より小さく、要素寸法依存性が生じている。これは、圧縮側のコンクリート構成則が要素寸法に係わらず唯一のものが用いられていることから、要素の小さい方が

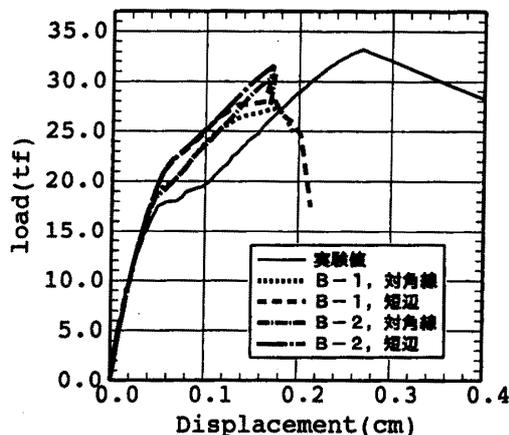


図-10 回転ひび割れモデルによる荷重-変位関係 (モデルB)

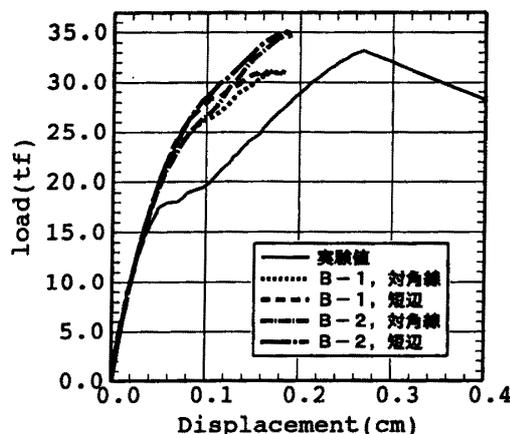


図-11 固定ひび割れモデルによる荷重-変位関係 (モデルB)

エネルギー吸収能が小さくなるためと考えられる。従って、せん断圧縮破壊の場合、耐荷力は圧縮コンクリートの構成則に大きく依存するため、要素寸法に係わらず、局所化要素内の吸収エネルギーを等価にするような概念を圧縮側の構成則にも導入する必要があると考えられる。

モデルAと同様に、モデルBの耐荷機構を調べるため、二つのひび割れモデルより得られたひび割れ図を図-12および図-13

に、実験のひび割れ図を図-14に示すが、二つのモデルともディープビーム特有のshear bandが見られ、斜め引張ひずみの発生以降、アーチ的耐荷機構に移行する性状が把握されている。このことから、せん断圧縮破壊を起こすような梁では、斜め引張破壊型の梁よりも主応力方向の変化が小さく、耐荷力に対してはひび割れのモデル化の影響が顕著に現れないと言える。

## 5. まとめ

- (1)せん断補強筋の無いRC梁のせん断破壊解析では、回転ひび割れモデルを用い、破壊エネルギーに基づく引張軟化特性を考慮すれば、比較的良い精度でせん断耐荷力を解析できる。
- (2)特に、せん断スパンが大きい梁では、固定ひび割れモデルとの差異は顕著であり、斜め引張破壊機構を適切に把握するには、回転ひび割れモデルの適用が有効である。
- (3)要素寸法依存性についても、斜めひび割れ破壊するRC梁では、回転ひび割れモデルを用い、引張の構成則に破壊エネルギーを導入することにより、かなり改善される。

謝辞：本解析に先立って行った実験では、土橋文彦君（山梨大学大学院）ほか多くの学生諸君に協力して頂いたことを深く感謝いたします。

### 【参考文献】

- [1] Rots.J.G.:Computational Modeling of Concrete Fracture, Dissertation, Delft University of Technology, 1988
- [2] Darwin.D,Pecknold.D.A.:Nonlinear Biaxial Law for Concrete, J.Eng.Mech.Div, ASCE, Vol.103, pp.229~241, 1977
- [3] Hillerborg.A.:Stability Problems in Fracture Mechanics Resting, Fracture of concrete and Rock, Elsevier Applied Science, pp.369~378, 1989
- [4] 内田裕市,六郷恵哲,小柳 治,:仮想ひびわれモデルを組込んだ分布ひびわれモデルによるコンクリートのひびわれの有限要素解析, 土木学会論文集V, pp.79~88, 1993
- [5] 二羽淳一郎,:FEM解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式, 日本コンクリート工学会, 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, 1983

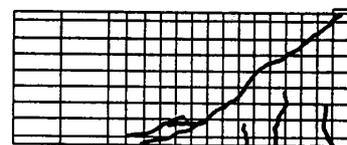
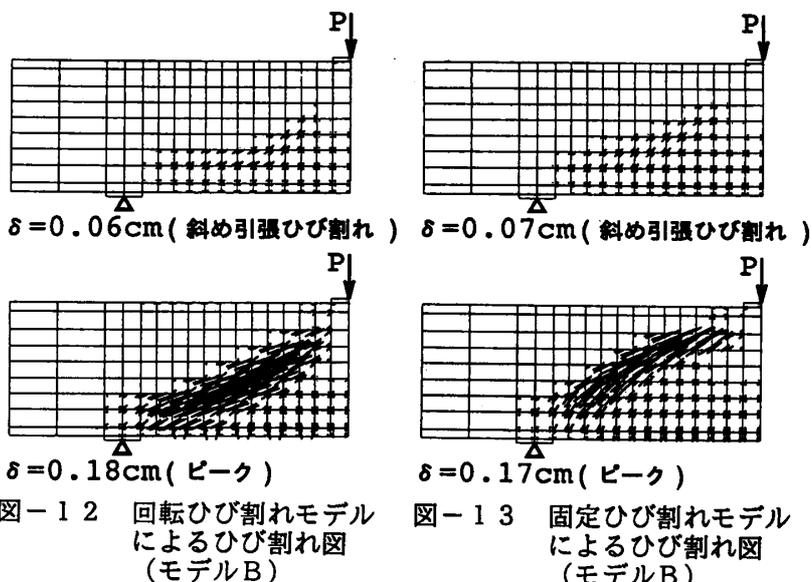


図-14 モデルBの実験結果