

報告

[2002] 無筋コンクリート梁の曲げ破壊解析

松元 香保里*1・中井 裕司*1

1. はじめに

コンクリートは微細なひびわれの発生・累積・連結・成長等によって非線形挙動をし、破壊に至る。この破壊過程を数値解析により高い精度で予測するには、平均的な応力評価に基づく従来の破壊基準では限界があるため、破壊力学的手法が応用されている。破壊力学の観点から破壊を扱う場合、ひびわれの先端に微細なひびわれが累積した破壊進行領域と呼ばれる非線形領域の存在を考慮したひびわれのモデル化が必要と考えられている。現在、代表的なひびわれのモデル化には、離散ひびわれモデルでは Hillerborg 等の提案した「仮想ひびわれモデル」と、分布ひびわれモデルでは Bazant 等の提案した「ひびわれ帯モデル」の2つがある [1]。これらのモデルでは、ひびわれ発生後の引張軟化特性をモデル化するために、破壊エネルギーおよび引張軟化曲線を導入している。

本研究は、無筋コンクリート梁の曲げ破壊について、破壊力学に基づき、仮想ひびわれモデルあるいはひびわれ帯モデルを用いてひびわれをモデル化した有限要素法と、要素分割によらない断面解析法の3つの手法で解析を行った。また、桁高、破壊エネルギー、引張軟化曲線、ヤング率をパラメータとし、曲げ強度に与える影響を調べた。

2. 解析方法

2.1 仮想ひびわれモデルによる有限要素法 [1]

仮想ひびわれモデルは、ひびわれ節点には結合力が作用し、ひびわれ先端での結合力が引張強度 f_t と負担する要素辺長の積に等しくなった場合にひびわれは進展し、開口変位 W (仮想的なひびわれ面間の距離) が限界開口変位 W_c に達すると結合力はゼロとなる。結

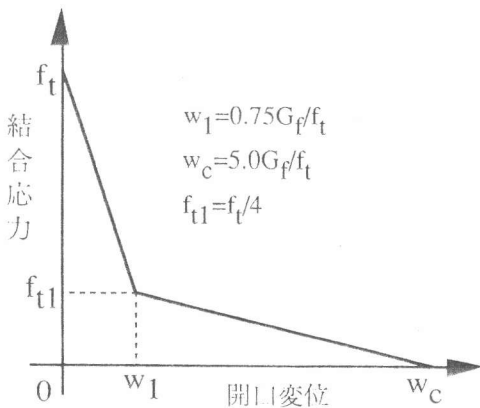


図-1 仮想ひびわれモデルにおける引張軟化曲線

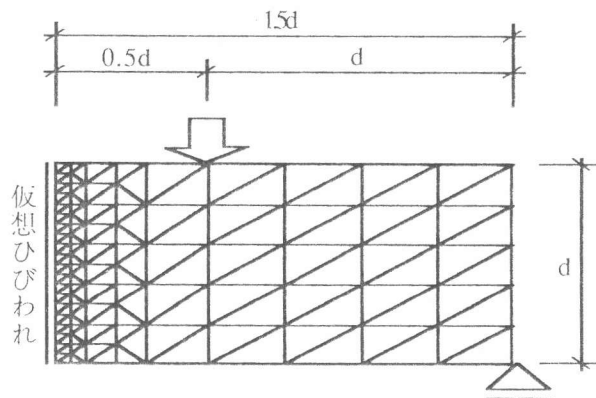


図-2 要素分割図 (仮想ひびわれモデル)

*1 住友建設(株)技術研究所 (正会員)

合力は開口変位の関数として引張軟化曲線より与えられ、本解析では引張軟化曲線に図-1の2直線1/4モデルを用いた。

解析は、大津氏の三角形平面歪要素を用いたFEMプログラムで行った [1]。破壊の進行領域に対応する仮想のひびわれモデル面は、節点数を21ヶとして部材中央に設けた。要素分割図を図-2に示す。

2.2 ひびわれ帯モデルによる有限要素法 [2]

ひびわれ帯モデルは、微細ひびわれが一様に分布しているひびわれの帯で表現したものである。解析には、汎用FEMコード"ADINA ver.6"を用いて、8節点四角形歪要素で計算した。引張軟化曲線は図-3に示す1直線モデルであり、除荷も考慮されている。このモデルでは、図-4に示す要素分割図の中央1要素の列(影部分)をひびわれ進展経路とし、最大主引張応力が一軸引張強度を超えると最大主引張応力に垂直な方向にひびわれが発生する。解析にあたっては、変位制御を基本とした自動増分コントロールの下で、第一の臨界荷重後も計算を続行した。

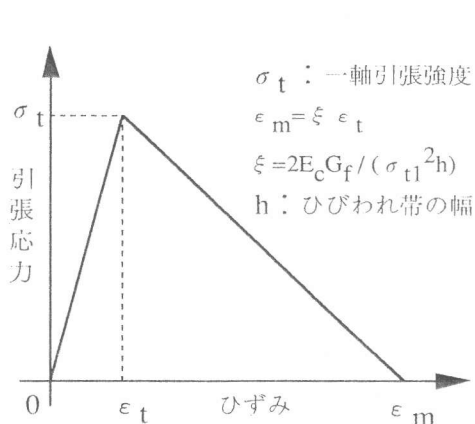


図-3 ADINAにおける引張軟化曲線

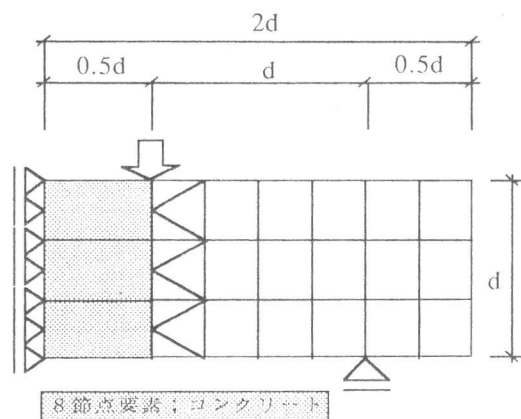


図-4 要素分割図(ADINA)

2.3 断面解析法 [3]

これは、内田氏等によって提案された解析手法であり、RC梁断面の曲げ解析によく用いられる断面解析によって耐力および変形を計算している。

本手法では、ひびわれは純曲げ区間に1本のみ発生し、その区間においても平面保持の法則が成り立つとした。式(1)に示すひびわれ断面の引張側の応力-歪関係は等価検長を純曲げ区間長として、弾性域の応力-歪曲線と引張軟化曲線を合成したものである。等価検長を純曲げスパン長としたのは次の理由による。

- ①ひびわれ帯モデルとひびわれ区間の整合性を持たせる。
- ②純曲げスパンの非等価検長部分のひびわれによる応力解放を評価するのが困難であり、曲率の計算意味が不明確になると考えられるためである。

$$\varepsilon_t = \sigma / E_c \quad (\varepsilon_t \leq f_t / E_c)$$

$$\varepsilon_t = \sigma / E_c + \omega(\sigma) / l_{eq} \quad (\varepsilon_t \geq f_t / E_c) \quad (1)$$

ここで、 σ は引張応力、 ϵ_t は引張歪、 E_c はヤング率、 $\omega(\sigma)$ はひびわれ巾を表わす応力の関数、 l_{cq} は等価検長である。以上より、中立軸位置、抵抗曲げモーメント

表-1 解析に用いたパラメータ

桁巾 b(cm)	桁高 d (cm)	ポアソン比 ν	ヤング率 E_c (kgf/cm ²)	引張強度 f_t (kgf/cm ²)	破壊エネルギー G_f (kgf/cm)
1	10	0.2	200000	30.0	0.10
	20		300000		0.15
	40		400000		0.20
			500000		

および載荷荷重を求めることができ、たわみは弾性荷重法により計算される。また、計算は限界ひびわれ幅の2倍に相当する下縁引張歪までとした。なお、本解析では2直線1/4モデルおよび1直線モデルの2種類の引張軟化曲線モデルを用いた。

3. 解析結果

解析には表-1に示すパラメータを用い、解析手法の特徴の比較およびパラメータ解析を行った。載荷方法はスパンd、せん断スパン比1の三等分点二点載荷である。

3.1 解析手法の比較

図-5は、各手法による解析結果と共通実験で実験値の下限値とされた内田氏らの実験結果[4]より得られる荷重-変位曲線である。曲げ強度は、引張強度に対して1.3~1.5倍に分布しており、解析手法により比較的大きな差異が生じている。さらに、荷重低下域の挙動および解の収束性にはかなりの相違がある。断面解析法は解の安定性に優れ、実験結果とも比較的近似した結果が得られており、モデルの再現は可能なようだ。一方、有限要素法は荷重低下域で、程度の差はあるものの解の発散が認められる。特に、ADINAによる解析では要素分割を細かくすると解の収束性が悪化する傾向があり、有限要素法的前提条件に抵触すると思われた。

図-6に各解法の曲げ強度時における部材中央(ADINAは断面中央に隣接した積分点位置)、即ちひびわれ部の応力状態を示す。応力状態は定性的には一致している。仮想ひびわれモデルでは引張軟化曲線は2直線1/4モデルであるため、引張側に2つの変曲点が生じている。また、仮想ひびわれモデルおよび断面解析法ではひびわれは1本と仮定しているのに対し、

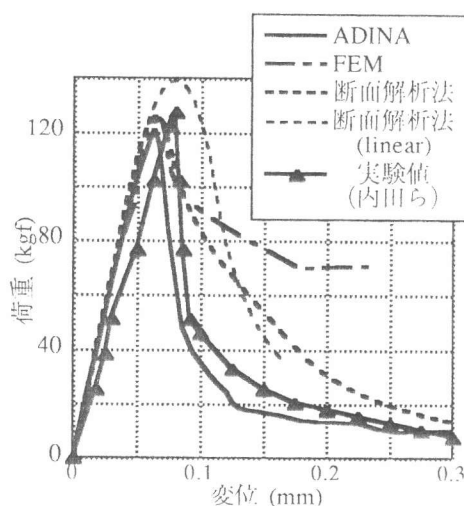


図-5 解析手法の比較

($d=20\text{cm}$, $E_c=3E5\text{kgf/cm}^2$, $G_f=0.1\text{kgf/cm}$)

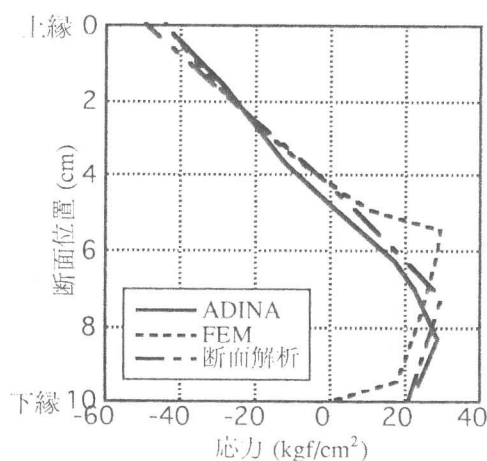
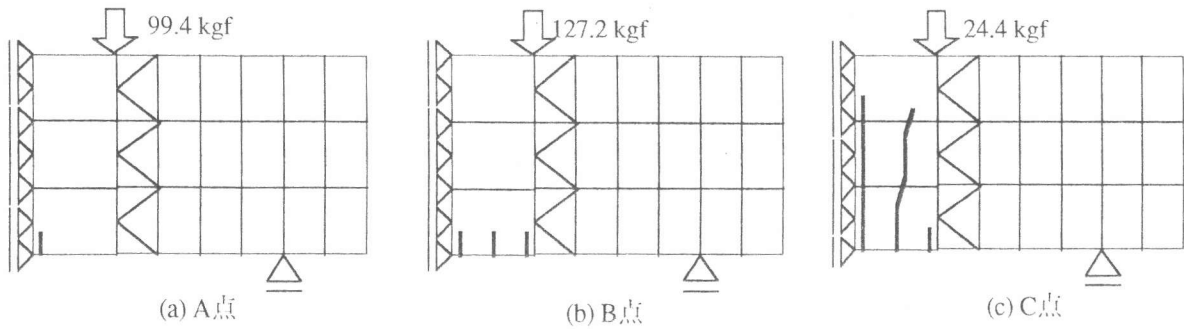


図-6 応力分布図 ($d=10\text{cm}$)



ADINA ではひびわれは分散して3本発生しているため、ひびわれ1本あたりのエネルギー消費量は少なくなる。従って、ADINAでは引張強度に達する断面位置が他の手法より低くなっている。

また、図-7はADINAの解析結果より得られたひびわれ図である。ADINAでは、ひびわれは破壊領域内の積分点において発生する。まず、ひびわれは部材中央付近に1本生じ、その後破壊領域内に分散して3本発生する。そして、破壊が進むに従い中央付近のひびわれが著しく成長し、局所化していく傾向が見られる。

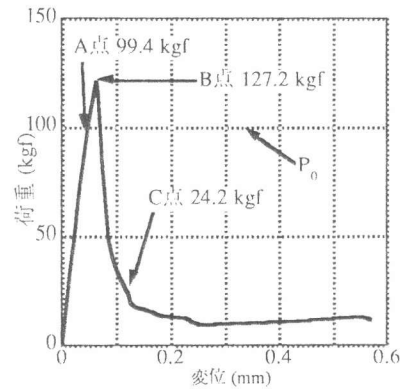


図-7 ADINAにおけるひびわれ分布 ($d=20\text{cm}, E_c=3E5\text{kgf/cm}^2, G_f=0.1\text{kgf/cm}$)

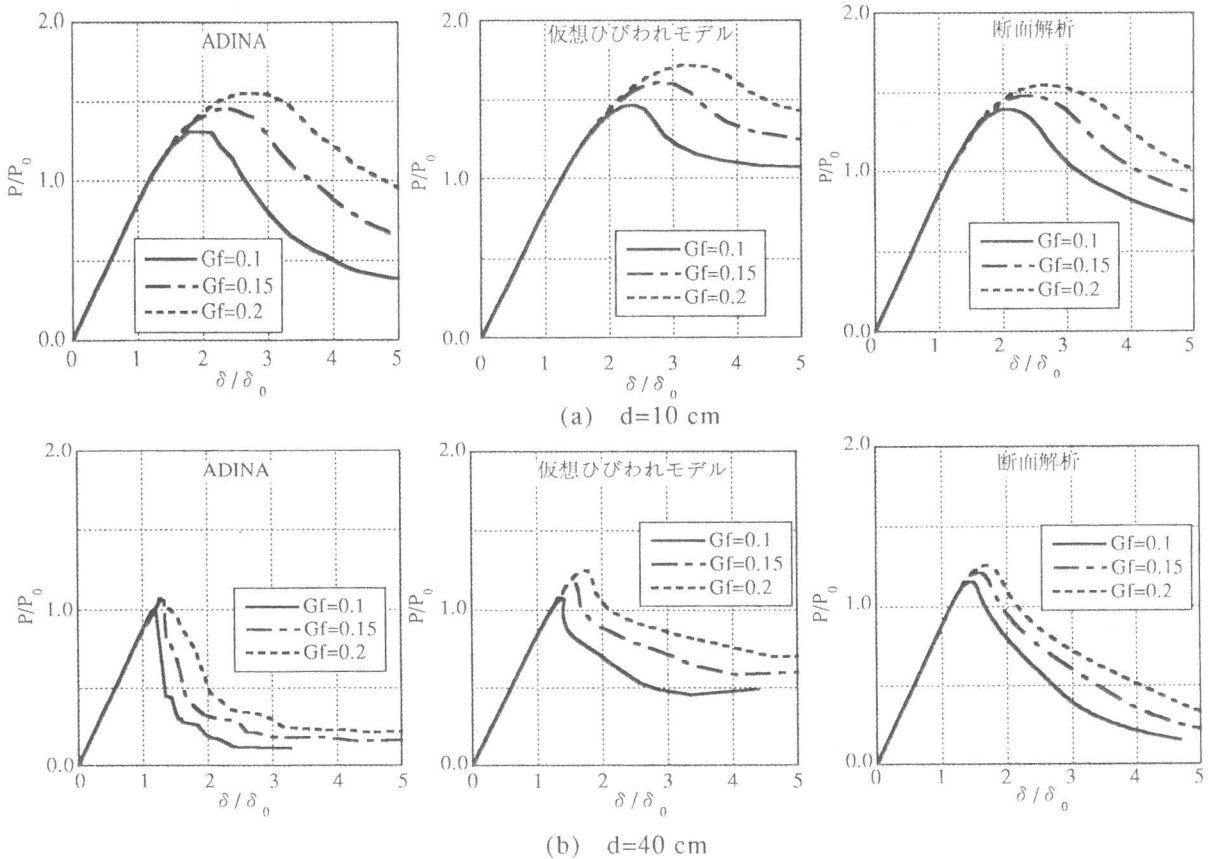


図-8 破壊エネルギーをパラメータとした解析結果 ($E_c=3E5\text{ kgf/cm}^2$)

3.2 パラメータ解析による結果

破壊エネルギーをパラメータとした解析結果を図-8に示す。横軸は梁理論より求めた部材下縁が引張強度となるたわみ量を基準に、縦軸は引張強度となる荷重を基準にそれぞれ無次元化している。各解析手法とも曲げ強度まで定性的に同一の挙動を示し、その後各々特色のあるものになっている。また、桁高が増加するに従い曲げ強度は減少し脆性的な破壊になり、破壊エネルギーの増加に従い、曲げ強度の増加と荷重低下域の靱性の増加が認められる。

いずれの解析手法とも、ひびわれはひびわれ断面において引張強度に達すると進展する。即ち、ひびわれ先端では引張強度に達しており、ひびわれ断面で引張強度となる部材下縁からの断面距離は、ひびわれ長さに等しい。図-9は曲げ強度時の部材中央のひびわれ断面におけるひびわれ長さと桁高の関係である。なお、縦軸はひびわれ長さを桁高で無次元化してある。桁高が小さいほど曲げ強度時におけるひびわれ長さの割合は大きく、ひびわれ発生後も桁高に対してひびわれがかなり進展するまで耐力を保持することが可能なことが分かる。従って、桁高が小さいほど曲げ強度は増加し、靱性の大きな破壊となる。

コンクリートのヤング率をパラメータとし、断面解析法で解析した。図-10にヤング率と曲げ強度の関係を示す。縦軸は曲げ強度時の荷重を引張強度時の荷重で無次元化してある。ヤング率の増加に従い、曲げ強度はほぼ線形的に増加する結果となった。

3.3 解析結果の評価

解析は、桁高、破壊エネルギーおよびヤング率を各々変化させ、桁高と特性長さの比が0.1~10の間で行われている。この範囲は、実構造物の寸法をほぼ網羅している。図-11は曲げ強度時の荷重を引張強度時の荷重で、曲げ強度時のたわみを引張強度時のたわみで無次元化した量の関係である。ひびわれ発生後のたわみは荷重増分に対して非線形に挙動しているが、曲げ強度と曲げ強度時のたわみ量はほぼ線形な関係が認められる。

図-12に、今回の解析結果と内田氏等の提案した曲げ強度の推定式(2) [3]の比較を示す。

$$f_t/f_t = 1 + 1 / (0.85 + 4.5 (d/l_{ch})) \quad (d/l_{ch} \geq 0.1) \quad (2)$$

ここで、 f_t, f_t は曲げ強度および一軸引張強度、 d は桁高、 l_{ch} は特性長さである。断面解析

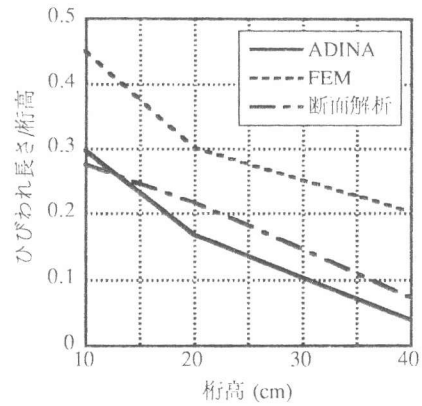


図-9 ひびわれ長さと桁高
($E_c=3E5\text{kgf/cm}^2, G_f=0.1\text{kgf/cm}$)

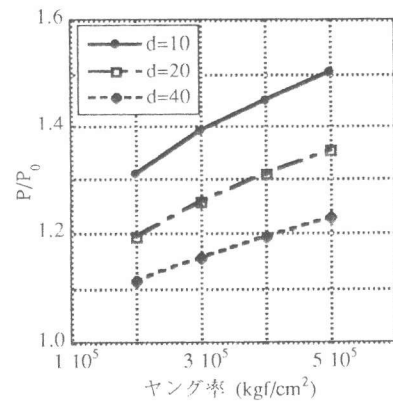


図-10 ヤング率と曲げ強度
(断面解析法、 $G_f=0.1\text{kgf/cm}$)

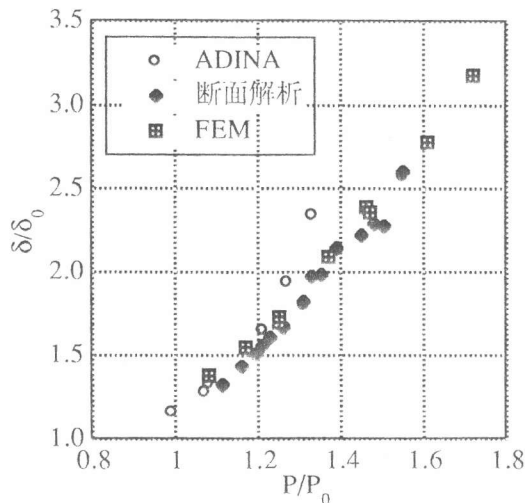


図-11 曲げ強度と曲げ強度時のたわみ

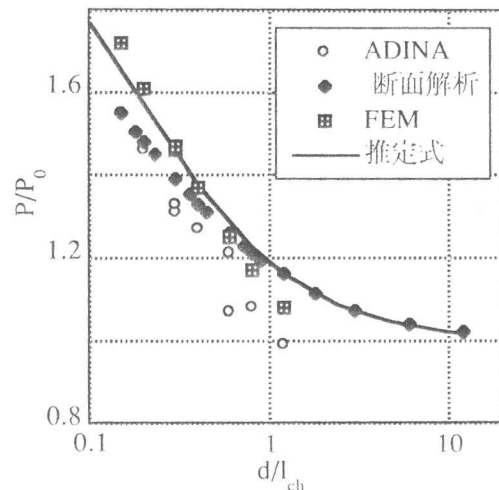


図-12 解析結果

法は、 $d/l_{ch} < 1$ で推定式より小さめの値となっている。この原因は、等価検長を純曲げスパンとしたためと思われる。また、ADINAによる解析結果は、他の解析結果より過小に評価される結果となった。

4. まとめ

無筋コンクリート梁の曲げ破壊解析において、破壊力学に基づいた3つの解析方法を適用し、パラメータ解析を行った結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 破壊エネルギーを考慮することにより、寸法効果を含んだ曲げ破壊の挙動を数値解析することが可能と確認された。
- (2) 解析手法により曲げ強度および荷重-変位曲線には比較的大きな差が認められた。
- (3) コンクリートの曲げ強度は、破壊エネルギーおよび引張軟化曲線のモデル化等の引張軟化特性、桁高およびヤング率の影響を受けることが分かった。

なお、本報告は(社)日本コンクリート工学協会・破壊力学の応用研究委員会の「コンクリート構造の破壊に関する共通解析および実験」に投稿したものに、修正、加筆を行ったものである。

【参考文献】

- 1) コンクリートの破壊力学研究委員会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム、第1部・委員会報告、日本コンクリート工学協会、pp.36-72、1990
- 2) Theory and Modeling Guide for Use of ADINA Version 6、1991
- 3) 内田裕市、六郷恵哲、小柳洽：コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討、土木学会論文集、No.442、1992
- 4) コンクリートの破壊力学研究委員会：報告書、第3部・コンクリート構造の破壊に関する共通解析および実験、日本コンクリート工学協会、pp.386-389、1993
- 5) 三橋博三：コンクリート構造への破壊力学の応用、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.1-10、1993