

# 論文 有限要素法による RC 部材のせん断破壊性状の検討

丁 則平\*1 梶貝 勇\*2 中村 光\*3

要旨：本論文は、せん断補強鉄筋を持たないRCはりのせん断破壊性状の解析における、非線形有限要素法の適用性を検討したものである。まず、等分布荷重を受ける単純はりのせん断破壊実験との比較により、不連続回転ひび割れモデルおよび破壊エネルギーに基づく引張軟化特性を用いた有限要素法解析の有効性を示した。さらに、連続桁のような不連続構造物中の部材をモデル化したはりのせん断破壊実験の結果を用いて、より複雑な断面力状態にあるこの種部材についても、その斜めひび割れ性状ならびにせん断破壊耐力を、有限要素法解析によって正確に評価できることを示した。

キーワード：せん断破壊性状、非線形有限要素法解析、不連続回転ひび割れモデル

## 1 はじめに

単一の、または、対称な2個の集中荷重を受けるせん断補強鉄筋のないRC単純はりのせん断破壊性状はほぼ明らかにされ、せん断耐力も経験式によって精度良く算定できるようになっている。また、等分布荷重を受ける単純はりおよび連続桁タイプの部材についても、せん断実験結果の蓄積が少しずつ進みつつあり、破壊を導く斜めひび割れの位置およびせん断耐力を精度良く評価する方法も提案されている[1]。一方、有限要素法を中心として、RC部材のせん断破壊性状を解析的に明らかにしようとする研究も活発に展開されているが、汎用性のある解析方法が確立されるには至っていないのが現状である。

本研究は、まず等分布荷重を受ける単純梁の荷重～変位関係、斜めひび割れ状況および終局せん断耐力の解析に対する非線形有限要素法の適用性を検討した上で、さらに、より複雑な場合として、スパン内に曲げモーメントの反曲点を有する、連続桁タイプの部材のせん断性状を解析的に評価することを試みたものである。

## 2 解析方法の概要

### 2.1 材料モデル

引張応力を受けるコンクリートの構成則として、軟化特性と破壊エネルギーを考慮した、図1に示す

応力～ひび割れ幅関係を用いた。破壊エネルギー  $G_f$  の値は、 $0.15\text{kg/cm}$  とした。この関係を有限要素法に取り入れる場合には、等価長さをを用いてひび割れ幅 ( $w$ ) をひずみ ( $\varepsilon$ ) に

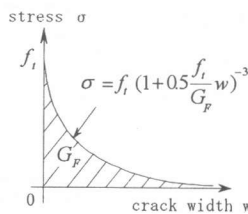


図1 応力～ひび割れ幅関係

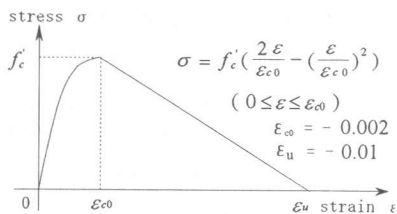


図2 圧縮側の応力～ひずみ関係

\*1 山梨大学工学研究科土木環境工学 (正会員)  
 \*2 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (正会員)  
 \*3 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (正会員)

変換する必要がある。等価長さの定め方に関してはいまだ不明な点が多いが、本解析では要素の幅を等価長さとすることにした。また、引張応力～ひずみ関係には簡単な原点指向型の除荷経路を仮定した。一方、圧縮領域におけるコンクリートの応力～ひずみ関係は、図2に示すように、最大圧縮応力 ( $f_c'$ ) までを2次曲線とし、その後直線的に応力が零まで減少するモデルを用いた。鉄筋の応力～ひずみ関係は、降伏点以降の剛性を零とした完全弾塑性モデルである。また、鉄筋とコンクリートとの付着は完全であると仮定している。

## 2. 2 ひび割れモデル

RCはりの有限要素法解析においては、固定ひび割れモデルを用い、ひび割れたコンクリートのせん断剛性を考慮する方法が広く用いられている。しかし、ひび割れの分散性を前提として成り立つ固定ひび割れモデルを用いたのでは、RCはりのせん断破壊、特に斜めひび割れが著しく局所化する斜め引張破壊を再現しにくいことも知られている。これに対する改善策として、回転ひび割れモデルの適用が効果的であることが報告されている [2]。回転ひび割れモデルは、常に主引張ひずみに直交する方向のひび割れを考えるので、ひび割れたコンクリートのせん断剛性を評価する必要がないこと、また、本質的にひび割れの局所化が起こりやすいモデルであることなど、せん断破壊の解析に有利な性質を持っている。しかし、例えば、鉄筋比が大きくせん断スパンの長いはりにおいては、ひび割れが過度に局所化するなどの問題もあり、その適用範囲には制限があると考えられる。これらの問題を解決するために、ここでは、固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデルの長所を併せ持つ「不連続回転ひび割れモデル」を提案した。すなわち、ひび割れが発生した後に主応力の方向が変化しても、ある限界に達するまではひび割れの回転を許さず、ひび割れ面でのせん断伝達を考慮するが、限界を超えた時点でひび割れの向きを主引張応力と直交する方向に回転させるモデルである。ひび割れたコンクリートのせん断剛性は  $0.2 G$  とした。ひび割れを回転させる条件に関してはさらに検討を要するるのであるが、若干の予備実験結果を参考にして、主応力方向とひび割れ面方向のずれ  $\theta$  が  $5^\circ$  に達したときを基準とした。

## 2. 3 解析手法

はりの解析は、二次元平面応力場問題として取り扱った。有限要素には四辺形アイソパラメトリック要素を用い、収束計算には、Newton-Raphson 法を採用した。また、ピーク荷重以降の挙動も検討できるように、多点荷重を与えられる変位増分法を採用している [3]。

## 3 検証実験の概要

まず、比較的単純な条件下で解析の妥当性を検討するために、等分布荷重を受ける単純はり供試体 100-0 及び 200-0 のせん断試験を行った。供試体の概要は表1、表2および図3に示すとおりで、幅 15cm、有効高さ 16cm、引張鉄筋比 4.22% の、せん断補強鉄筋のない単鉄筋矩形断面である。スパン長の  $1/2$  と有効高さとの比 ( $L_1/d$ ) は、それぞれ 3.13 および 6.25 である。次に、分布荷重が作用する不連続構造物中の部材をモデル化して行われた実験結果、すなわち、等分布荷重および張出し部に集中荷重を受ける単純はりのせん断試験結果 (V シリーズ) [1] との比較を行うことにより、さらに複雑な条件下における解析の適用性を検討した。供

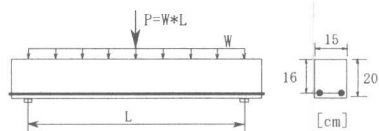


図3 単純はりの形状・寸法

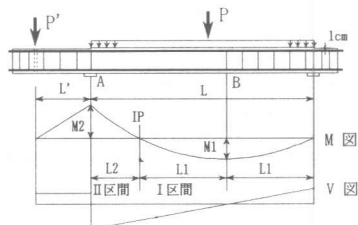


図4 張出し部を持つ単純はり

表1 鉄筋の性質

供試体	種類	降伏点 ( $kgf/cm^2$ )	ヤング係数 ( $kgf/cm^2$ )
100-0	D25	3900	$1.84 \times 10^6$
200-0	D25	3900	$1.84 \times 10^6$
Vシリーズ	D22	3620	$1.78 \times 10^6$
	D19	3761	$1.87 \times 10^6$
	D10	3390	$1.68 \times 10^6$

表2 供試体の諸元

供試体番号	$L$ ( $cm$ )	$L$ ( $cm$ )	$M_2 / M_1$	$L_1 / d$	$L_2 / d$	$f_c$ ( $kgf/cm^2$ )	$P_u$ %
100-0	100	0.0	0.0	3.13	—	335	4.22
200-0	200	0.0	0.0	6.25	—	318	4.22
V-025	160	45.0	0.25	4.72	0.56	330	3.23
V-050	160	45.0	0.50	4.49	1.01	313	3.23
V-075	160	45.0	0.75	4.30	1.39	341	3.23
V-10	160	45.0	1.00	4.14	1.72	299	2.39
V-30	160	45.0	3.00	3.33	3.33	290	2.39
V-40	160	45.0	4.00	3.09	3.82	339	3.23
V-50	160	45.0	5.00	2.90	4.20	318	3.23
V-70	160	45.0	7.00	2.61	4.78	322	3.23

試体の概要は表 2 および図 4 のとおりである。負の支点モーメント  $M_2$  と

正のスパンモーメント  $M_1$  の比は 0.0 から 7.0 の範囲で変化させており、せん断破壊を生じさせた試験部分である区間 I および区間 II のせん断スパン比 ( $L_1/d$ 、 $L_2/d$ ) は 0.56 から 4.72 にわたっている。

#### 4 解析方法の検討

等分布荷重を受ける単純はり供試体 100-0 および 200-0 について、荷重～変位関係、斜めひび割れ状況および終局耐荷力の解析を行った。要素寸法の影響も検討するために、2通りの要素分割を用いている。細かい分割 (100-0-a、200-0-a、図 5 参照) における要素幅は 5cm、粗い分割 (100-0-b、200-0-b) における要素幅は 10cm である。解析に用いた材料特性値は実験と同一である。

##### 4.1 ひび割れモデルの適用性に関する考察

図 6～図 9 は、終局時におけるひび割れ状況の実験結果と解析結果を比較して示したものである。スパンの短い 100-0 で観察した斜めひび割れは、図 6 に示すように、せん断スパンのほぼ全域にわたって発生している。回転ひび割れを用いた解析では、せん断スパン中央部で主鉄筋に沿ったひび割れが卓越する傾向は認められるものの、破壊時における斜めひび割れの発生状況は実験結果ならびに不連続回転ひび割れによる解析結果 (図 7) と大差ないものであった。スパンの長い 200-0 供試体の実験では、卓越した斜めひび割れが支点から距離 1.7d の付近に発生している。回転ひび割れによる解析では、図 8 のように、引張鉄筋に沿ったほぼ水平なひび割れが局所化しており、実験結果とは明らかに異なったひび割れパターンとなっている。これに対して、不連続回転ひび割れによる解析では、図 9 のよ

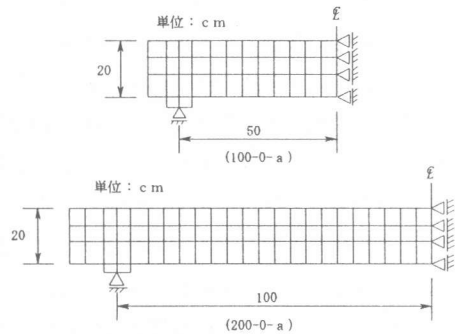


図 5 要素分割方法 (分割 a)

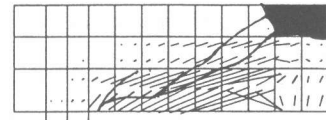


図 6 100-0-a (回転)

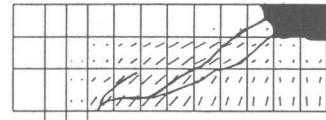


図 7 100-0-a (不連続回転)

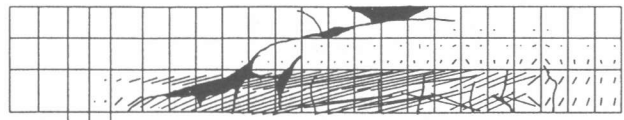


図 8 200-0-a (回転)

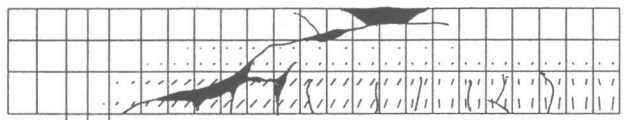


図 9 200-0-a (不連続回転)

うに、実験結果とおおよそ一致したひび割れパターンが得られている。せん断破壊荷重の解析結果は表-3に示すとおりで、スパンの短い100-0においては、どちらのひび割れモデルを用いても耐荷力に大差はない。一方、スパンの長い200-0の場合には、回転ひび割れモデルに

表-3 解析により得られた終局荷重P (tf)

供試体		回転ひび割れ	不連続回転ひび割れ
100-0	a	32.74 (0.85)	32.72 (0.85)
	b	32.90 (0.85)	34.46 (0.89)
200-0	a	13.52 (0.72)	16.83 (0.89)
	b	14.14 (0.75)	17.42 (0.92)

( )中の値は、終局荷重比(解析値/実験値)である。

よる耐荷力は明らかに実験値より小さいが、不連続回転ひび割れによる耐荷力は、実験値の89%~92%と若干低めではあるものの、ほぼ実験値と一致していると考えられる。

#### 4.2 要素寸法の影響に関する考察

図10および図11は、100-0および200-0供試体の荷重~スパン中央変位の関係を、不連続回転ひび割れモデルを用いた解析結果とともに示したものである。同図中の矢印は、ひび割れ図及び荷重~変位図を用いて判断した斜めひび割れの発生を示す。これらの図から、巨視的に見た荷重~変位関係は、いずれの供試体においても、要素寸法によらずほぼ同一であることが分かる。要素寸法依存性を解消することは有限要素法解析において重要な問題であるが、本解析ではコンクリートの引張軟化特性に破壊エネルギー基準を導入することによって、ほぼこの問題をクリアーしている。ただし、詳しく言えば、粗い要素分割の場合の方が、①斜めひび割れ発生荷重を明確に判断しやすい、②斜めひび割れの発生による剛性の変化が明瞭である、③終局荷重・終局変位の値が幾分大きい、など若干の相違は認められる。また、解析で得られた荷重~変位曲線は、実験結果に比べてやや硬めである。特に、斜めひび割れの発生による剛性の低下を十分に表していない。そのため、スパン/有効高さ比が小さい部材については終局変位を過小評価することになるので、これらの点に関してはさらに検討が必要である。表3に示したように、要素分割が細かい場合(分割a)と粗い場合(分割b)とで、せん断破壊荷重の解析値の差はわずか3~4%である。また、斜めひび割れ発生荷重の解析値は、スパンの短い100-0については、分割aで18.0~20.5tf、分割bで19.4tfであり、スパンの長い200-0においては、分割aで12.1tf、分割bで12.5tfであって、耐力に関しても要素寸法依存性に特に問題はないこと、および実験結果ともほぼ一致すること、が確認された。

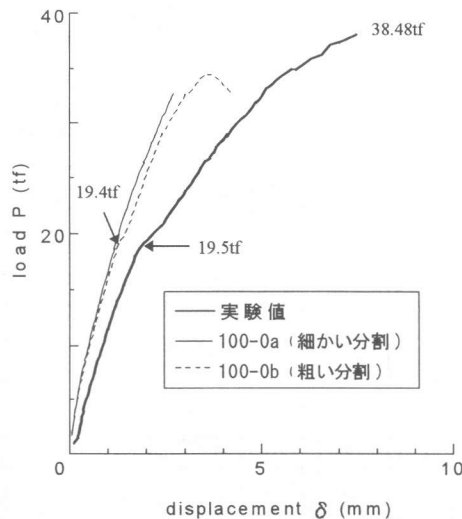


図10 100-0の荷重~変位曲線

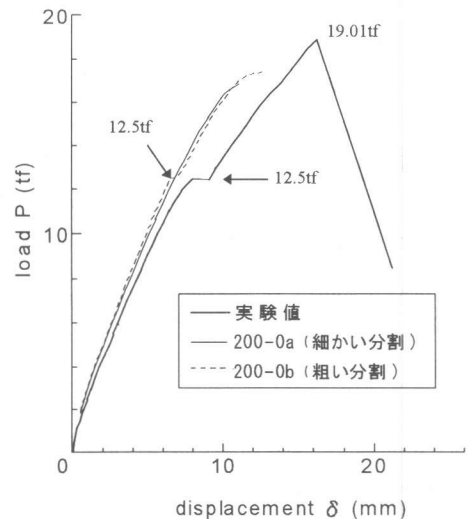


図11 200-0の荷重~変位曲線

## 5 等分布荷重が作用する連続桁タイプの部材への適用性の検討

前述のように、等分布荷重を受ける単純はりのせん断性状は、不連続回転ひび割れモデルを用いた非線形有限要素法解析によってほぼ評価できることが分かった。そこで、スパン内に反曲点を持つ放物線状のモーメント分布ならびに直線状に変化するせん断力分布を持った、より複雑な条件下にあるVシリーズの供試体について、本解析方法の適用性を検討することとした。

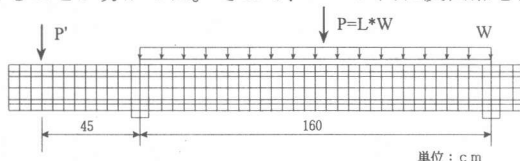


図 1.2 Vシリーズの要素分割方法

解析における要素分割の概要は図 1.2 のとおりで、要素の幅は 5cm を基準にした。なお、実験では供試体の正確な変位が測定されていないため、荷重～変位関係の比較は行っていない。

8体の供試体についての終局耐荷力比(解析値/実験値)は、図 1.3 に白丸で示しており、1.03～1.39 の範囲にあり、平均 1.15 とさほど悪い結果ではないが、特に V-075、V-10 及び V-30 の 3 供試体において、解析値が実験値より著しく大きいことが明らかである。これら 3 体の供試体は、いずれも破壊区間の区間長 ( $L_1$  または  $L_2$ ) が比較的小さいものであることなどから、上記のような特定領域における不一致の原因は、圧縮に対するコンクリートの応力～ひずみ関係において、直交方向の引張ひずみ ( $\epsilon_1$ ) による強度低下を無視したことにあると考え、さらに Collins ら [4] の式による圧縮強度の低減

(図 1.4 参照) を解析に導入することとした。このような改良を施した解析により得られた終局荷重比は、表 4 および図 1.3 (黒丸印) に併せて示したように、0.92～1.13 の範囲内にあり、平均値 1.01、変動係数 6.2% という良好な結果となった。図 1.5 は、解析および実験による終局時の斜めひび割れの発生状況を比較したものである。すべての供試体で、区間 II に作用するせん断力は区間 I に比べて大きいのであるが、モーメントの分布状態、従って反曲点の位置によっては区間 I においてせん断破壊が生ずる。表 4 に示したように、解析によって判定した破壊区間は、 $M_2/M_1=1.0$  の V-10 供試体を除いて、すべて実験結果と一致しており、このような破壊性状は本解析によって十分に評価されていることが明らかである。なお、ここでは、卓越した斜めひび割れが存在する区間を破壊区間と定義している。

表 4 終局荷重の解析結果

供試体番号	実験結果		解析結果		終局荷重比 (解析値/実験値)
	終局荷重 (t)	破壊区間	終局荷重 (t)	破壊区間	
V-025	19.1	I	21.65	I	1.13
V-050	22.9	I	21.18	I	0.92
V-075	20.5	I	21.00	I	1.02
V-10	16.0	I	15.90	I～II	0.99
V-30	10.4	II	11.17	II	1.07
V-40	12.4	II	12.05	II	0.97
V-50	11.4	II	10.96	II	0.96
V-70	9.5	II	9.89	II	1.04

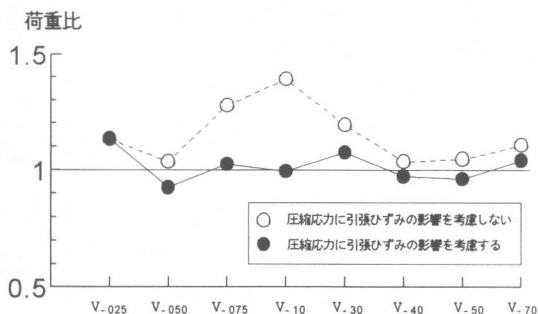


図 1.3 終局荷重比の比較

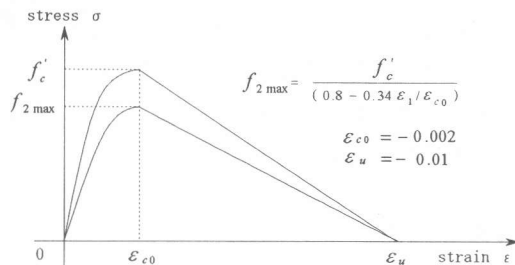


図 1.4  $\epsilon_1$  による圧縮強度の低減

すべての供試体で、区間 II に作用するせん断力は区間 I に比べて大きいのであるが、モーメントの分布状態、従って反曲点の位置によっては区間 I においてせん断破壊が生ずる。表 4 に示したように、解析によって判定した破壊区間は、 $M_2/M_1=1.0$  の V-10 供試体を除いて、すべて実験結果と一致しており、このような破壊性状は本解析によって十分に評価されていることが明らかである。なお、ここでは、卓越した斜めひび割れが存在する区間を破壊区間と定義している。

## 6 結論

著者らの提案する不連続回転ひび割れモデル、破壊エネルギー基準に基づく引張軟化特性、および、Collinsの提案する直交方向の引張ひずみによる圧縮強度の低減、を導入した非線形有限要素法解析により、等分布荷重を受ける連続桁タイプのせん断補強鉄筋を有しないRCはり部材についてせん断挙動の計算を行い、実験結果と比較検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 本解析法により、等分布荷重を受ける連続桁タイプのはり部材について、そのせん断性状、すなわち、斜めひび割れ発生荷重、斜めひび割れ発生位置、せん断破壊荷重などが、精度良く評価できることが確かめられた。
- (2) 限られた範囲での検討ではあるが、本解析法によれば、有限要素法解析における要素分割依存性をかなり解消できることが確かめられた。
- (3) スパン内に曲げモーメントの反曲点を持つ部材では、せん断破壊は、必ずしもせん断力が大い区間で起こるわけではなく、条件によっては作用せん断力の小さな区間において発生するのであるが、本解析を用いれば、このような性状も十分に表現できることが確かめられた。

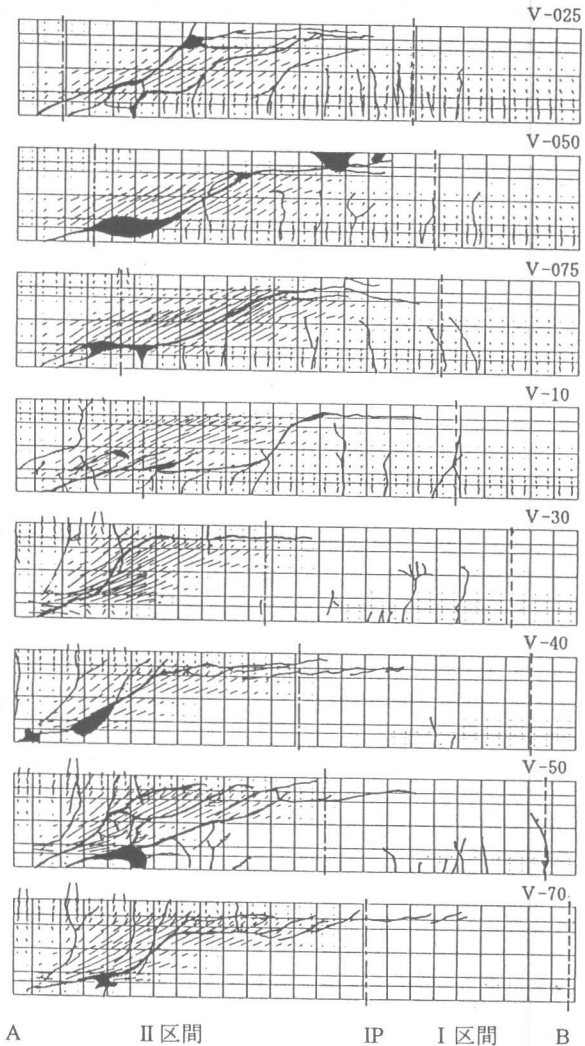


図15 Vシリーズの斜めひび割れ状況

### 【参考文献】

- [1] 桧貝勇：等分布荷重を受け、曲げモーメントの反曲点をスパン内に持つRCはりのせん断耐力、土木学会論文集 No. 460/V-18, pp. 49-56, 1993. 2
- [2] 山谷敦、中村光、飯塚敬一、桧貝勇：回転ひび割れモデルによるRC梁のせん断挙動解析、コンクリート工学論文報告集、Vol. 18, No. 2, pp. 359-364, 1996
- [3] 飯塚敬一、中村光、足立正信、桧貝勇：RCボックスカルバート構造の終局変形挙動に関する解析的研究、コンクリート工学論文報告 Vol. 17, No. 2, pp. 475-480, 1995
- [4] F. J. Vecchio and M. P. Collins: The modified compression-field theory for reinforced concrete element subjected to shear, ACI Journal, March-April 1986, pp. 219-231