

## 論文 せん断スパン比の小さい部材のせん断挙動に関する解析的研究

中越亮太\*<sup>1</sup>・幸左賢二\*<sup>2</sup>・西岡勉\*<sup>3</sup>・小林寛\*<sup>4</sup>

要旨：せん断スパン比(以下， $a/d$ )が小さく，せん断補強筋を有するディープビーム部材を対象に， $a/d$ とせん断補強筋比をパラメータとして，単純梁を用いた鉛直載荷実験と2次元FEM解析を行い，せん断抵抗に関する破壊メカニズムについての検討を行った。その結果， $a/d = 0.5, 1.0$ の供試体はせん断圧縮破壊， $a/d = 1.5$ の供試体は斜めせん断ひび割れが支配的な破壊と， $a/d$ により破壊性状が異なることが分かった。

キ - ワ - ド：ディープビーム，せん断スパン比，FEM解析，破壊メカニズム

## 1. はじめに

現行のディープビームのせん断耐力評価式はディープビーム形状の梁を単純載荷した供試体の実験式であり，試験体によって破壊形態やせん断抵抗に大きな差異が発生し，せん断耐力にばらつきが生じる等，その損傷メカニズムは十分には解明されていない。このようにディープビームにおいては不明確な点が多いため，壁式橋脚や開削トンネルでは通常の棒部材としてせん断耐力が算定される。このため，断面寸法が大きくなり，不経済な設計となっている場合が多い。このような背景から，コンクリートやせん断補強筋の $a/d$ の効果を考慮した合理的なせん断耐力算定法の確立が求められる。

本研究では，せん断補強筋を有するディープビーム部材を対象に， $a/d$ とせん断補強筋比をパラメータとして，単純梁を用いた鉛直載荷実験<sup>1)</sup>と2次元FEM解析を行い，せん断抵抗に関する破壊メカニズムについての検討を行った。

## 2. ディープビームの載荷実験

## 2.1 供試体諸元

実験供試体の諸元を表 - 1 に，供試体形状及び載荷条件，配筋状況を図 - 1(例としてB-2,3)に示す。実験は $a/d(0.5, 1.0, 1.5)$ とせん断補強筋比(0, 0.4%)をパラメータとして行った。ただし， $a/d = 1.0$ であるB-6, 7供試体は，下面の締め固め不良による不陸が原因で支承版との付着面積が少なくなり，局所的な圧壊が起きたと考えられるため，検討対象から除外した。せん断補強筋を配置しないB-2, 6, 10供試体にはひずみの測定のために，ダミー鉄筋(D4鉄筋)を配置した。図 - 2 にひずみと変位の測定位置(例としてB-2)を示す。ストラットのひずみは，二羽らの手法<sup>2)</sup>を参考にし，ひずみゲージを貼付したアクリル製の角棒(アクリルバー)を載荷版中央と支承版中央を結ぶストラット部に埋め込んで測定を行った。また，ストラット部の載荷版及び支承版付近にはデジタルビデオカメラを常設し，破壊の様子や載荷によるひび割れの進展状況を撮影した。

\*1 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (学生会員)

\*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科教授 Ph.D (正会員)

\*3 阪神高速道路公団 工務部 設計課 (正会員)

\*4 独立行政法人土木研究所 耐震設計グループ耐震チーム (正会員)

表-1 実験供試体諸元

供試体 No.	せん断スパン比 a/d	せん断スパン a[mm]	有効高さ d[mm]	部材幅 b[mm]	せん断補強鉄筋比 $\rho_w$ [%]	引張主鉄筋比 $\rho_t$ [mm]	圧縮強度 $\sigma_{ck}$ [Mpa]
B-2	0.5	200	400	240	0.0	2.02	36.2
B-3					0.4		
B-6					0.0		
B-6R	1.0	400	400	240	0.0	2.02	31.3
B-7					0.4		36.2
B-7R					0.0		31.3
B-10	1.5	600	400	240	0.0	2.02	29.2
B-11					0.4		

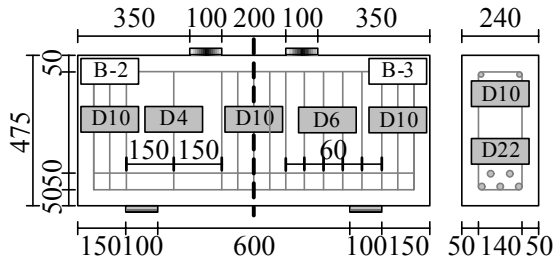


図 - 1 B-2,3 供試体形状

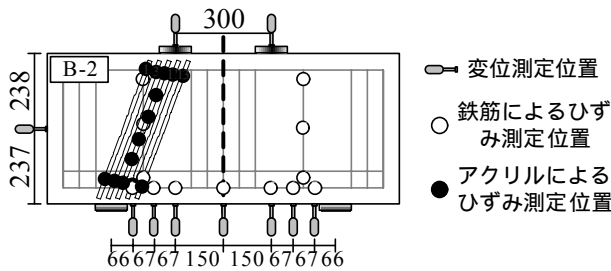


図 - 2 B-2 供試体測定位置

表 - 2 実験結果のまとめ

a/d	$\rho_w$	0.0[%]		0.4[%]	
		供試体No.	B-2	B-3	B-6R
0.5	最大荷重	1550[kN]	1536[kN]	1050[kN]	1181[kN]
	破壊形態	せん断圧縮破壊	せん断圧縮破壊	せん断圧縮破壊	せん断圧縮破壊
	ひび割れ図と破壊位置				
1.0	最大荷重	615[kN]	1025[kN]	615[kN]	1025[kN]
	破壊形態	斜めせん断破壊	斜めせん断破壊	斜めせん断破壊	斜めせん断破壊
	ひび割れ図と破壊位置				

アクリルバーの圧縮ひずみが  $-3500[\mu]$  超えた場所  
縦方向鉄筋の引張ひずみが  $1800[\mu]$  超えた場所

## 2.2 実験結果

表 - 2 に全 6 体の実験結果を示す。a/d =

0.5, 1.0 の供試体(B-2, 3, 6R, 7R)は, ダミー鉄筋またはせん断補強筋が降伏することなく, ストラット領域にせん断ひび割れが進展し, 支承版または荷版付近のコンクリートが大きく剥離することでせん断圧縮破壊に至った。また, a/d = 1.5 の供試体(B-10, 11)は, 引張による斜めひび割れがストラット下部に進展し, ダミー鉄筋またはせん断補強筋が降伏した後に, 斜めせん断破壊に至った。

## 2.3 破壊時のひずみ

図 - 3 に全供試体のアクリルバーにより測定した圧縮ひずみが, 最も大きく発生した位置における進展状況を示す。せん断圧縮破壊を起こした a/d = 0.5, 1.0 の供試体は, 圧縮ひずみが道路橋示方書による終局ひずみである  $-3500\mu$  を超え, その位置周辺でコンクリートの大きな剥離が起き, 終局に至った。図 - 4 に全供試体のダミー鉄筋及びせん断補強筋により測定した引張ひずみが, 最も大きく発生した位置における進展状況を示す。どの供試体も, 鉄筋ひずみはストラット中央付近で大きく進展し, a/d = 1.5 の供試体は鉄筋の降伏ひずみである  $1800\mu$  を超え, 縦方向に配置した鉄筋は降伏に至り, その後最大荷重に至った。よって, せん断圧縮破壊となる a/d 1.0 の供試体は, ストラット部で, 圧縮ひずみが  $-3500\mu$  を超えると同時に破壊に至り, a/d = 1.5 程度の供試体は, ストラット下部の斜めひび割れによって引張ひずみが進展し, 降伏ひずみを超えた後に, 破壊に至ることが分かった。

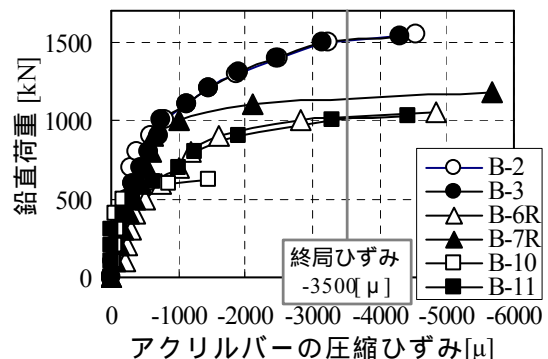


図 - 3 圧縮ひずみの進展状況

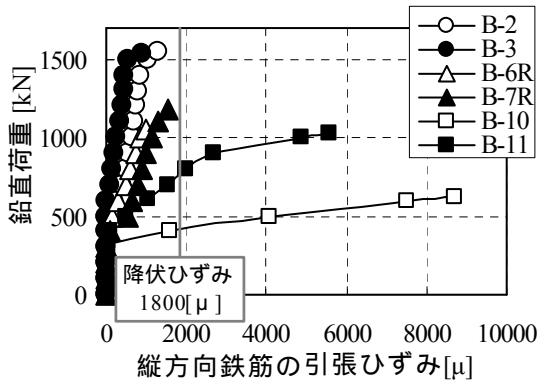


図 - 4 引張ひずみの進展状況

### 3. FEM 解析

#### 3.1 解析手法

本解析には FEM による 2 次元弾塑性解析を用いた。供試体のモデル化は、供試体形状正面図と同じ形状に、実験と同じ長さの奥行き幅  $b$  を設定した。また、荷重条件は、実験における荷重版設置部分に等分布荷重を荷重した。境界条件は、実験における支承版設置位置を鉛直方向で固定し、左右対称の供試体であるため、中央線的位置を水平方向固定とした。

解析に用いた要素特性は、コンクリートには平面応力要素、鉄筋には線材要素を使用し、鉄筋とコンクリートは完全付着としている。表 - 3 にコンクリートおよび鉄筋の材料特性を示す。コンクリートの二軸圧縮状態における降伏および破壊基準としては、二軸圧縮強度を  $1.16 c$  ( $c$ : 一軸圧縮強度) として、内部摩擦角を  $\phi = 10^\circ$ 、粘着力を  $C = 0.42 c$  と設定した Drucker-Prager の条件を用いた<sup>3)</sup>。引張-圧縮状態および二軸引張状態では、最大主応力が引張強度を超えるとひび割れが発生すると仮定し、ひび割れ発生後はせん断剛性を低減させた。図 - 5 にコンクリートの応力-ひずみモデルを示す。圧縮上昇域では圧縮強度までを二次放物線とし、その後は応力が直線的に減少するモデルを用いた。引張域については、引張強度  $\sigma_t$  までは直線的に応力が増加すると仮定した。図 - 6 にひび割れ発生後におけるせん断伝達係数  $\beta$  と、ひび割れ発生後

のひずみの関係を示す。鉄筋の応力-ひずみモデルとしては、図 - 7 に示すように横軸にひび割れに垂直な方向のひずみを取り、鉄筋降伏強度に達した後、降伏ひずみの 8.5 倍の降伏棚領域を設け、その後はひずみ硬化を考慮したモデルを用いている。

表 - 3 材料定数

	弾性係数 $E_c$ [MPa]	圧縮強度 $\sigma_{ck}$ [MPa]	引張強度 $\sigma_t$ [MPa]	ポアソン比
コンクリート	22000	36.2	2.1	0.2
	弾性係数 $E_s$ [MPa]	降伏点強度 $\sigma_{sy}$ [MPa]	降伏ひずみ [μ]	引張強度 $\sigma_{su}$ [MPa]
鉄筋	210000	345	1800	518

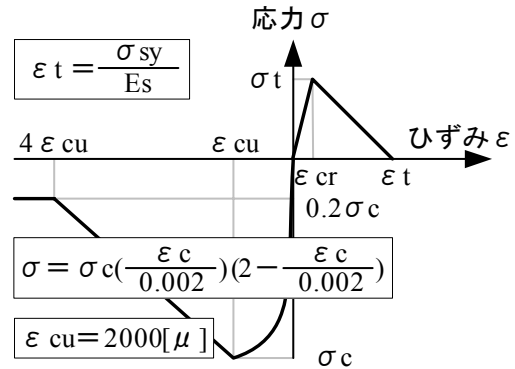


図 - 5 コンクリートの応力-ひずみ

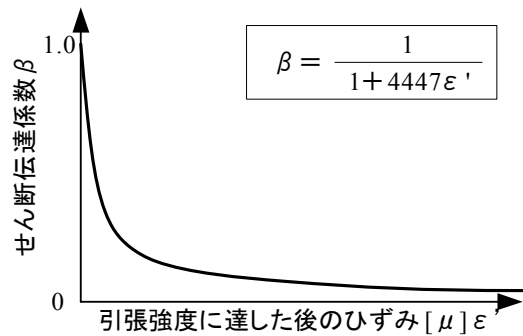


図 - 6 せん断伝達係数

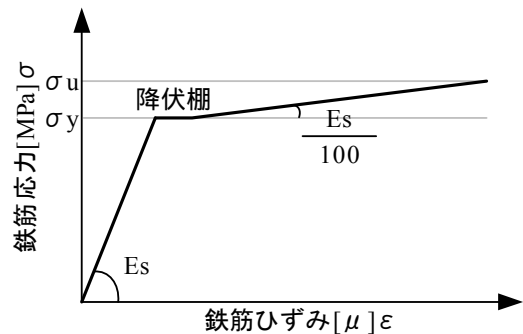


図 - 7 鉄筋の応力-ひずみ関係

### 3.2 最大荷重の定義

$a/d=0.5, 1.0$  の供試体の実験は、最大荷重時に支承版または載荷版付近で、圧縮ひずみが  $-3500\mu$  を超え、 $a/d = 1.5$  の供試体の実験は、主要なひび割れが引張により進展し、そのひび割れが直接破壊に影響を及ぼしていることが分かった。よって、解析は図 - 8, 9 に示すように、ストラットを横切る断面の最小主ひずみが、いずれも  $-3500\mu$  を超えた場合、または予備解析によって算出されたストラット下部の引張領域を線で結び、その位置の最大主ひずみが、いずれも  $2000\mu$  を超えた場合に最大荷重に至ると定義した。

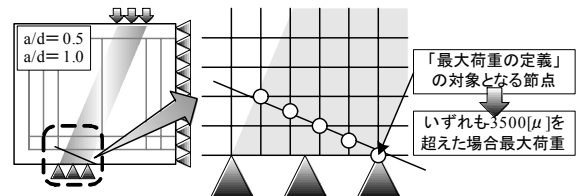


図 - 8 最大荷重の定義(せん断圧縮破壊)

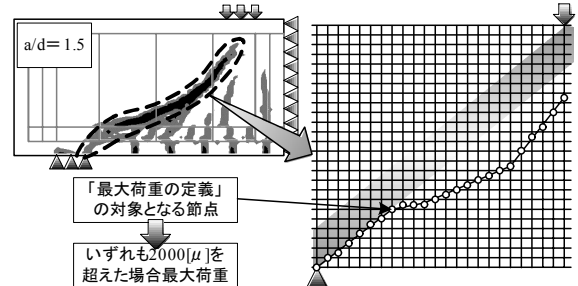


図 - 9 最大荷重の定義(斜めせん断破壊)

## 4. 実験と解析結果の比較と考察

### 4.1 解析結果

解析による最大荷重と、その時点のひび割れ状況を表 - 4 に、実験と解析の下面中央位置の荷重変位関係と最大耐力の比較を図 - 10, 11 に示す。解析値は実験値にほぼ対応しており、ディープビーム特有の  $a/d$  がせん断耐力に及ぼす影響も確認された。ひび割れ図は、コンクリートの最大主ひずみが、図 - 5 に示すような軟化する時点の引張ひずみ  $\epsilon_r$  に達したときに、引張ひずみの垂直方向にひび割れが発生するものと定義し、図 - 12 に示すように、最大主ひずみが  $4\epsilon_r$  に達した点を滑らかな線で結ぶことで、ひび割れを明確に表した。

以下に  $a/d = 0.5, 1.5$  の破壊に関する考察を行う。図 - 13 に最大荷重時での圧縮ひずみ及び引張ひずみ分布を示す。解析における圧縮ひずみは最小主ひずみを表し、引張ひずみは最大主ひずみを表す。また、図 - 14 に解析の B-2, 10 供試体のせん断ひずみ分布を示す。

### 4.2 $a/d = 0.5$ の場合

B-2, 3 供試体の実験は、載荷版及び支承版からストラットの位置にひび割れが発生しているが、解析は支承版から発生するひび割れしか確認できない。これは、解析によるひび

表 - 4 解析結果

		pw	
		0.0[%]	0.4[%]
0.5	供試体No.	B-2	B-3
	最大荷重	1525[kN]	1548[kN]
	ひび割れ図		
1.0	供試体No.	B-6R	B-7R
	最大荷重	812[kN]	970[kN]
	ひび割れ図		
1.5	供試体No.	B-10	B-11
	最大荷重	670[kN]	924[kN]
	ひび割れ図		

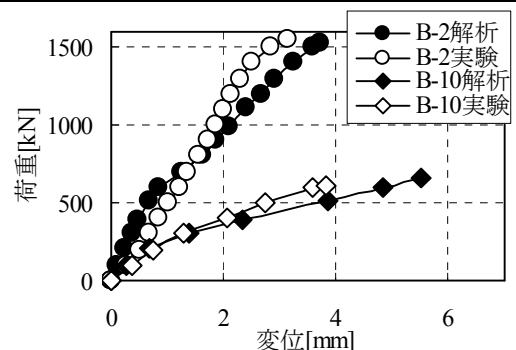


図 - 10 荷重変位関係

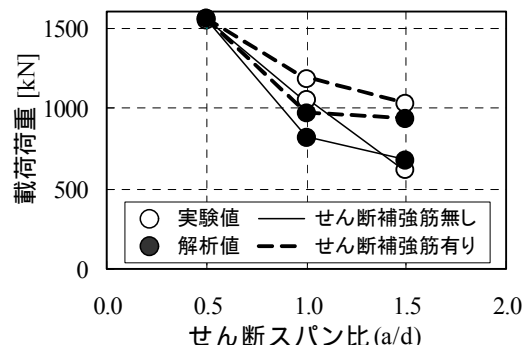


図 - 11 最大耐力の比較

割れが最大主ひずみにより発生するためであり，最大荷重時の最小主ひずみ分布から，載荷版付近の破壊は圧縮ひずみの進展によると考えられる。図 - 13 より，解析はストラットにせん断ひび割れが発生し，載荷版及び支承版付近に比較的大きな最小主ひずみが発生している。また，支承版付近は実験と同様に圧縮ひずみが $-3500\mu$ を超えている。このような傾向は B-3, 6, 7 供試体も同様であった。

#### 4.3 a/d = 1.5 の場合

B-10, 11 供試体の実験は，破壊直前まで，せん断ひび割れがストラット下部周辺を支承版内側から載荷版方向に向い，最大荷重時に載荷版付近にコンクリートの剥離が見られ，せん断ひび割れが貫通する。一方，解析は実験と同様な位置に主要なせん断ひび割れと，小さな曲げひび割れが発生し，最大荷重に至る。図 - 13 より，実験は大きな圧縮ひずみは計測されず，解析も $-2000\mu$ を超える最小主ひずみは支承版付近にしか確認できない。また，実験はストラット中央のダミー鉄筋の引張ひずみが，降伏ひずみである $1800\mu$ を大きく超え，解析の最大主ひずみはストラット下部に比較的大きな値で発生している。図 - 15, 16 に B-2, 10 供試体の最大主ひずみとせん断ひずみが最も大きく発生した位置でのひずみと，ポアソン比を考慮した最小主ひずみの進展状況を示す。B-2 供試体はひずみの進展傾向が

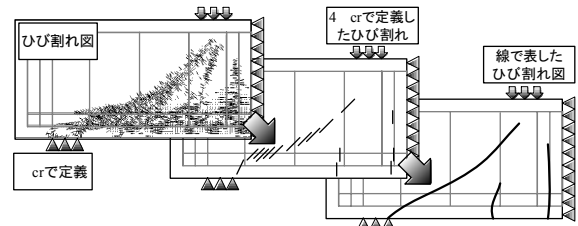


図 - 12 ひび割れ図の定義

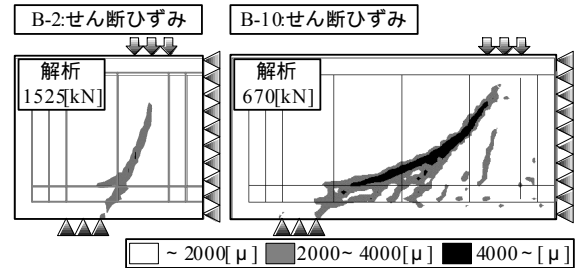


図 - 14 せん断ひずみ分布

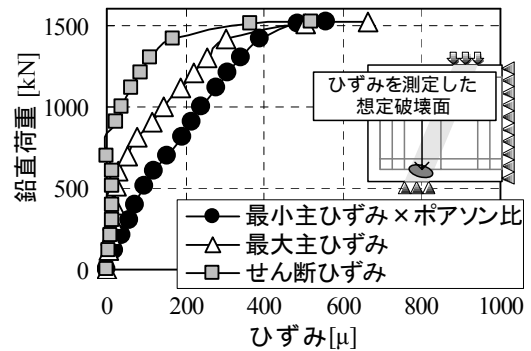


図 - 15 ひずみの進展状況(B-2)

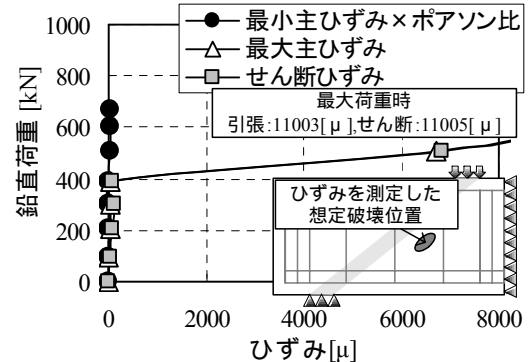


図 - 16 ひずみの進展状況(B-10)

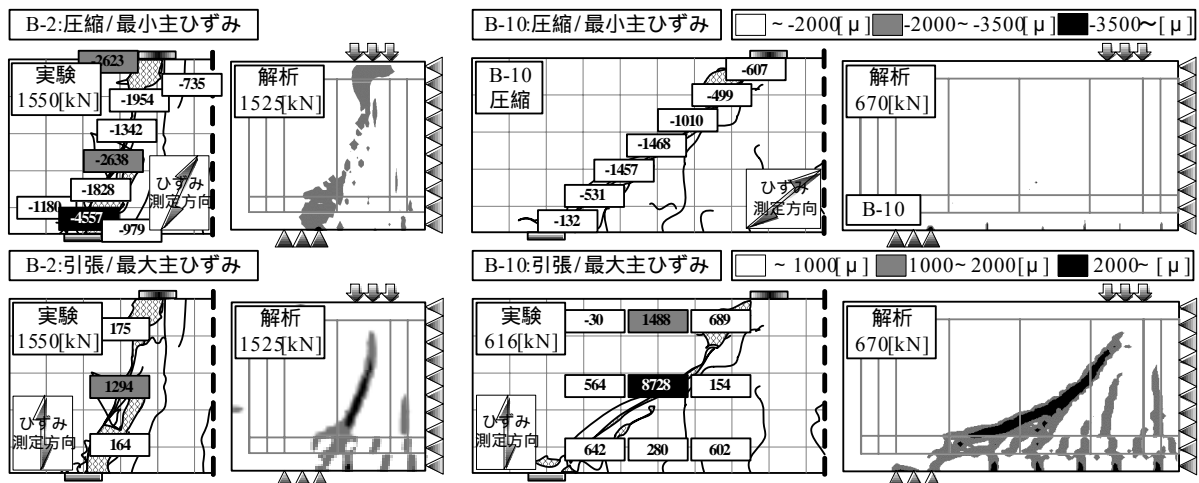


図 - 13 ひずみ分布(B-2,10)

ほぼ一致している。一方，B-10 供試体の最大主ひずみとせん断ひずみは急激に進展するが，ポアソン比を考慮した最小主ひずみは大きな進展が見られない。これは，最大主ひずみが圧縮応力のポアソン効果により発生していないことを表す。よって，図 - 14 より，せん断ひずみと最大主ひずみは同様な分布を示すことから，B-10 供試体はせん断(ズレ)によって最大主ひずみが発生し，その引張が破壊に影響を及ぼすと考えられる。このような傾向は B-11 供試体も同様であった。

### 5. 破壊メカニズムの推定

実験と解析結果より得られた破壊模式図を図 - 17 に，フローを図 - 18 に示す。 $a/d = 1.0$  の部材は，ストラット内の載荷版直下または支承版直上付近で圧縮力が卓越し，その位置のせん断ひび割れが進展することで，せん断圧縮破壊に至る。また， $a/d = 1.5$  程度の部材は，初期段階はストラット下部に，せん断と引張による斜めひび割れが支承版下部から進展し，ひび割れが載荷版付近に達すると，支承版及び載荷版付近からひび割れが進展することで斜めせん断破壊に至る。よって，ストラット下部に発生するせん断ひび割れが，せん断耐力を支配すると考えられる。また， $a/d = 1.0$  の部材は載荷版及び支承版付近の圧壊が破壊の主要因となるため，せん断補強筋の効果は小さく， $a/d = 1.5$  程度の部材は，初期段階に発生する斜めひび割れが破壊の主要因となるため，せん断補強筋が効果を発揮するものと考えられる。

### 6. まとめ

ディーブーム部材の実験及び2次元 FEM 解析を実施し，得られた結果を以下に示す。  
 (1)最大荷重の定義を，ストラットを横切る断面の最小主ひずみが， $-3500 \mu$  を超えた場合，またはストラット下部の引張領域の最大主ひずみが， $2000 \mu$  を超えた場合とすることで，

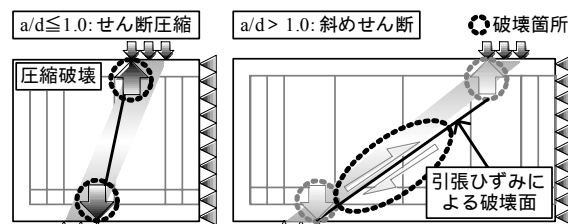


図 - 17 破壊メカニズムの模式図

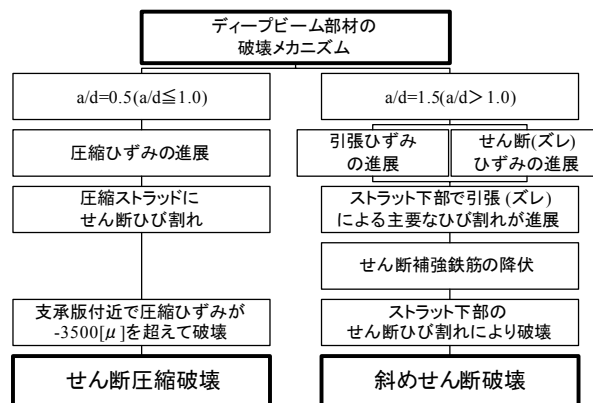


図 - 18 破壊メカニズムのフロー

破壊形態を精度良く評価することができた。  
 (2) $a/d = 1.0$  の部材に対する FEM 解析の結果，ストラット内の載荷版直下及び支承版直上の領域で最小主ひずみが $-3500 \mu$  を大きく超え，ポアソン効果によるせん断ひび割れが支承板位置から載荷板に向かって進展することで，せん断圧縮破壊に至ると考えられる。  
 (3) $a/d = 1.5$  程度の部材に対する FEM 解析の結果，ストラット下部でせん断ひずみと最大主ひずみが  $2000 \mu$  を超え，その位置に主要な斜めせん断ひび割れが進展することで，斜めせん断破壊に至ると考えられる。

### 参考文献

- 1)梅本洋平, 幸左賢二, 西岡勉, 小林寛: せん断スパン比をパラメータとしたディーブームの破壊形態に関する実験的検討, 第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2004.1
- 2)松尾真紀, Torsak Lertsrisakulrat, 柳川明哲, 二羽淳一郎: せん断補強筋を有する RC ディーブームのせん断挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, 2001.7
- 3)W.F.Chen: コンクリート構造物の塑性解析, 丸善株式会社, pp.83-127, 1985