

# 論文 軸引張力と曲げモーメントを受ける RC 部材のせん断耐力に関する研究

高澤 英樹<sup>\*1</sup>・飯塚 信太郎<sup>\*2</sup>・関 博<sup>\*3</sup>

**要旨**：軸引張力と曲げモーメントを受ける RC 部材のせん断耐力に関して検討を行った。帯鉄筋なしの供試体 12 体と帯鉄筋ありの供試体 20 体についてせん断スパン比、軸引張力、帯鉄筋比、主鉄筋強度をパラメータとして実験を行った。次に、有限要素法による解析を行い、得られた実験結果と照合しその妥当性を確認し、さらにせん断耐力に関するパラメータ解析を実施してせん断耐力式を提案した。

**キーワード**：鉄筋コンクリート、せん断、軸引張力、有限要素法

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート部材のせん断に関しては従来から多くの研究がなされているが、軸引張力を受ける RC 部材の研究例は少ない。直下型地震で大きな鉛直加速度が作用する場合、ラーメン構造の柱部材に対して水平力による釣り合いモーメントの影響で軸方向に引張が作用する場合など、柱部材において軸引張力と水平力を同時に受ける場合が存在する。田村ら<sup>1)</sup>は軸引張力を受ける RC 梁部材について軸引張力、せん断スパン比を変化させて系統的な実験を行い、貴重なデータを提示している。しかし、軸引張力を受ける RC 柱部材において軸引張力、曲げモーメント、せん断力の組合せ断面力を受けた部材の挙動は不明確な点が多く、設計法も整備されているとは言い難い。

そこで本研究では RC 柱部材に対してせん断スパン比、軸引張力、帯鉄筋比、主鉄筋強度をパラメータとして一方向載荷の基礎的なせん断実験を行った。さらに有限要素法解析を行った結果と実験結果を照合した。その結果を基にパラメータ解析を行い、解析結果を利用して RC 柱部材のせん断耐力式を提案することを試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

図-1 に供試体の断面形状および配筋を示した。基本寸法は、柱部材が 120×180×750mm であり、柱部材の有効高さは 160mm である。また、軸引張力を導入するため鉄筋を U 字型に取り付け、中心にねじ部を設けた鉄板を打設時に柱上部のコンクリートの中に埋め込んだ。使用した鉄筋は主鉄筋として柱部材には異型棒鋼 D13 (SD345) を曲げ圧縮、引張各部に 3 本ずつ、帯鉄筋として丸鋼 φ6 (SR235) を柱部材に 120mm 間隔で用いた。この値を基本として主鉄筋強度をパラメータとしたものは柱部材の主鉄筋の種類のみを SD295, SD390 に変え、帯鉄筋をパラメータとしたものは帯鉄筋間隔のみを 80, 160mm に変えた。コンクリート強度、鉄筋降伏強度は表-1 にまとめて示した。

### 2.2 載荷方法

加力は図-2 に示す載荷装置を用いて最初にねじ部にセンターホールジャッキで所定の軸引張力を導入した後、油圧ジャッキで水平力を破壊まで徐々に加えた。なお、水平力が加えられ、柱が傾いた場合でも常に軸引張力が鉛直に加力されるようにセンターホールジ

\*1 北陸電力(株) (正会員)

\*2 早稲田大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻

\*3 早稲田大学教授 理工学部 土木工学科 工博 (正会員)

ヤッキと柱部材の間にピンを接合し、柱の変位にあわせて水平移動棒により鉛直力を加力する位置を移動させた。

### 2.3 パラメータ

本実験の供試体のパラメータは以下の4種類である。

- ①せん断スパン比    ②軸引張力
- ③鉄筋比            ④主鉄筋強度

①において、せん断スパン比はせん断破壊から曲げ破壊への破壊モードの移行についても把握することを目的として、2.0, 2.5, 3.0, 3.5 の4種類で実験を行った。以下それぞれをA, B, C, Dの記号で表す。

②において、軸引張力は0, 1, 2N/mm<sup>2</sup>の3種類で実験を行った。これらの記号はA1のように①の記号の後に数字で表した。

③において、帯鉄筋なしと帯鉄筋間隔80mm, 120mm, 160mmの4種類で実験を行った。今回120mmが示方書で決められている最小補強鉄筋量でありその前後で実験を行った。これらの記号は帯鉄筋なしの場合は何も記さず、ありの場合はtを①の記号の後に示し、基本である120mm以外はBt2 - S160のように基本記号に説明をつけた。

④において、主鉄筋種類SD295, SD345, SD390の3種類で実験を行った。これらの記号は基本であるSD345以外は③と同様Bt2 - SD390のように基本記号に説明をつけた。

なお、帯鉄筋なしを除く③と④においては帯鉄筋ありのBシリーズで軸引張力を0と2N/mm<sup>2</sup>で変化させた。

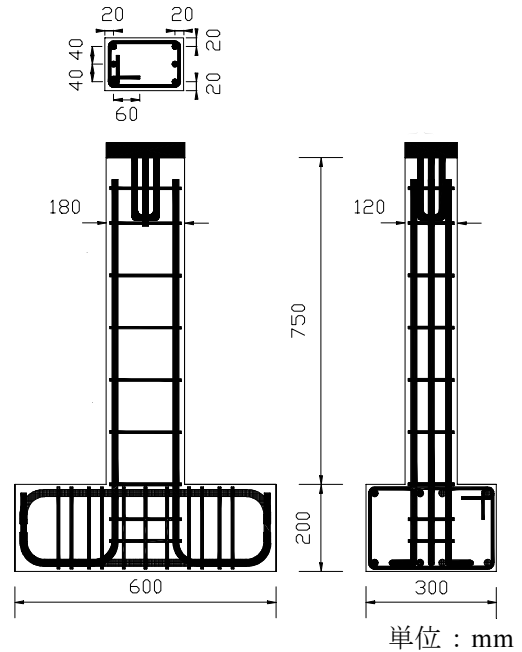


図-1 実験供試体図（基本供試体）

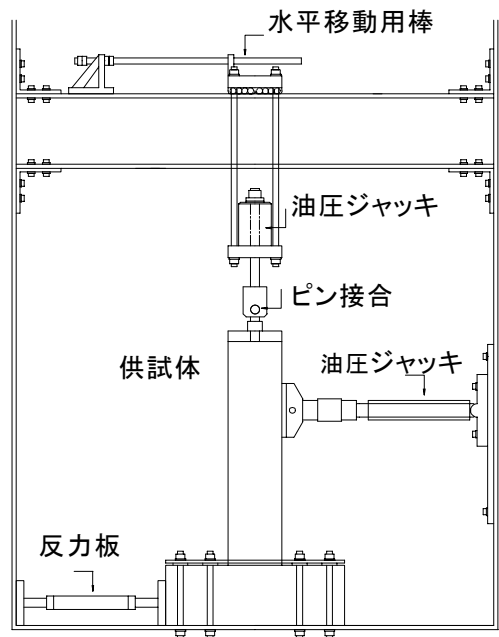


図-2 加力装置

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 帯鉄筋なしの場合

荷重-変位関係において明確な最大点が見られたことから、最大を破壊荷重として表-1に示した。

破壊モードは、破壊時において主鉄筋が降伏していないものをせん断破壊とした。今回すべての供試体について主鉄筋が降伏しな

ったのですべてせん断破壊であり、破壊時の最終ひび割れ状況を見ると斜めひび割れが卓越していた。

### 3.2 帯鉄筋ありの場合

荷重-変位関係において明確な最大点が見られないものが多く、帯鉄筋降伏した後も荷重が増加した。このことから土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書）<sup>2)</sup>のよう

表一 実験データおよび解析データ

供試体名	材料強度				実験値			算定値			
	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{yt}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{yt}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$P_{yt}$ (kN)	$P_{yt}$ (kN)	$P_{exp}$ (kN)	$P_{JSCE}$ (kN)	$P_{CSA}$ (kN)	$P_{WC}$ (kN)	$P_{cal}$ (kN)
A0	26.0	2.4	364	/	/	/	34.0	31.6	23.7	34.4	37.0
A1	26.5	2.2	373	/	/	/	34.0	25.7	23.2	32.8	31.7
A2	26.5	2.2	373	/	/	/	31.2	18.8	22.4	31.8	28.9
B0	26.5	2.2	373	/	/	/	28.7	28.6	23.1	29.8	29.6
B1	26.5	2.2	373	/	/	/	28.4	23.2	22.3	25.7	27.2
B2	26.0	2.4	364	/	/	/	25.5	17.0	21.2	27.3	26.4
C0	26.5	2.2	373	/	/	/	25.7	26.5	22.2	26.1	26.1
C1	26.5	2.2	373	/	/	/	20.5	21.6	21.5	24.1	23.9
C2	26.5	2.2	373	/	/	/	20.1	15.8	20.7	23.3	21.7
D0	26.0	2.4	364	/	/	/	26.4	25.1	21.1	26.6	25.0
D1	26.5	2.2	373	/	/	/	22.2	20.4	20.7	22.7	21.5
D2	26.0	2.4	364	/	/	/	22.4	14.9	19.9	24.3	20.9
At0	26.5	2.2	373	320	58.0	53.1	59.0	52.3	42.4	57.6	57.4
At1	26.5	2.2	373	320	45.9	42.0	55.0	46.4	41.6	54.4	54.4
At2	26.5	2.2	373	320	51.7	44.9	53.0	39.6	40.7	51.8	51.3
Bt0	26.5	2.2	373	320	40.5	44.5	46.4	49.2	40.5	47.6	46.9
Bt1	26.5	2.2	373	320	39.7	43.8	45.4	44.0	47.1	44.9	45.0
Bt2	26.5	2.2	373	320	39.2	43.1	43.8	37.8	43.4	43.7	43.4
Bt0-S80	26.0	2.4	364	320	40.2	49.7	48.7	49.6	49.6	47.6	45.7
Bt2-S80	26.0	2.4	364	320	35.7	50.5	43.6	42.1	42.1	42.7	42.1
Bt0-S160	26.0	2.4	364	320	39.8	34.2	39.7	44.1	35.7	46.4	43.5
Bt2-S160	26.0	2.4	364	320	38.7	36.0	41.7	31.7	34.1	41.5	38.9
Bt0-SD295	26.0	2.4	332	320	41.3	46.2	47.1	45.4	45.4	43.4	42.1
Bt2-SD295	26.0	2.4	332	320	35.4	41.5	40.4	37.8	37.9	38.7	37.9
Bt0-SD390	26.0	2.4	427	320	44.1	44.3	50.8	49.2	41.9	53.9	52.8
Bt2-SD390	26.0	2.4	427	320	45.9	35.1	45.5	37.8	40.4	48.2	48.4
Ct0	26.5	2.2	373	320	32.4	42.6	40.9	42.4	42.4	39.7	39.7
Ct1	26.5	2.2	373	320	35.1	39.7	40.6	39.3	39.3	38.0	38.0
Ct2	26.5	2.2	373	320	30.4	34.3	35.7	36.1	36.1	36.2	36.1
Dt0	26.5	2.2	373	320	24.9	30.6	30.6	36.3	36.3	34.8	34.5
Dt1	26.5	2.2	373	320	23.4	35.4	31.7	33.7	33.7	32.4	33.0
Dt2	26.5	2.2	373	320	27.7	35.3	31.1	31.0	31.0	31.3	31.0
供試体名	実験値との比				破壊モード					表と式の文字の意味	
	$P_{exp}/P_{JSCE}$	$P_{exp}/P_{CSA}$	$P_{exp}/P_{WC}$	$P_{exp}/P_{cal}$	実験	示方書 準用式	CSA	Pro-wc	提案式		
A0	1.08	1.43	0.99	0.92	S	S	S	S	S	$A_t$ : 引張主鉄筋断面積	
A1	1.32	1.46	1.04	1.07	S	S	S	S	S	$A_t$ : 帯鉄筋断面積	
A2	1.66	1.39	0.98	1.08	S	S	S	S	S	a/d : せん断スパン比	
B0	1.00	1.24	0.96	0.97	S	S	S	S	S	$\sigma_n$ : 軸引張応力度	
B1	1.22	1.27	1.10	1.05	S	S	S	S	S	$b_w$ : 幅	
B2	1.50	1.20	0.93	0.97	S	S	S	S	S	d : 有効高さ	
C0	0.97	1.16	0.99	0.99	S	S	S	S	S	$f_c$ : コンクリート圧縮強度	
C1	0.95	0.95	0.85	0.86	S	S	S	S	S	$f_t$ : コンクリート引張強度	
C2	1.27	0.97	0.86	0.92	S	S	S	S	S	$f_{yt}$ : 引張主鉄筋降伏強度	
D0	1.05	1.25	0.99	1.05	S	S	S	S	S	$f_{yt}$ : 帯鉄筋降伏強度	
D1	1.09	1.07	0.98	1.03	S	S	S	S	S	$P_{yt}$ : 引張主筋降伏荷重 (実験)	
D2	1.50	1.13	0.92	1.07	S	S	S	S	S	$P_{yt}$ : 帯鉄筋降伏荷重 (実験)	
At0	1.13	1.39	1.03	1.03	S	S	S	S	S	$P_{exp}$ : 破壊荷重 (実験)	
At1	1.19	1.32	1.01	1.01	S	S	S	M	S	$P_{JSCE}$ : 破壊耐力 (示方書準用式)	
At2	1.34	1.30	1.02	1.03	S	S	S	S	S	せん断耐力 (示方書×せん断 スパン比を考慮する項 (0.75 +1.4/a/d) ) と曲げ耐力 (純曲 げ理論) のうち小さいほうの 値	
Bt0	0.94	1.14	0.98	0.99	M	S	S	M	M	$P_{CSA}$ : 破壊耐力 (カナダ設計基準)	
Bt1	1.03	0.96	1.01	1.01	M	S	$M_p$	S	M	$P_{WC}$ : 破壊耐力 (Pro-wc)	
Bt2	1.16	1.01	1.00	1.01	M	S	$M_p$	M	$M_p$	$P_{cal}$ : 破壊耐力 (提案式)	
Bt0-S80	0.98	0.98	1.02	1.06	M	$M_p$	$M_p$	M	M	提案式 (2), (3), (4) のう ち最小の値	
Bt2-S80	1.03	1.03	1.02	1.03	M	$M_p$	$M_p$	M	$M_p$	破壊モード	
Bt0-S160	0.90	1.11	0.86	0.91	S	S	S	S	S	S : せん断破壊	
Bt2-S160	1.32	1.22	1.01	1.07	S	S	S	S	S	M : 曲げ破壊	
Bt0-SD295	1.04	1.04	1.09	1.12	M	$M_p$	$M_p$	M	M	$M_p$ : 曲げ破壊 (純曲げ理論)	
Bt2-SD295	1.07	1.07	1.05	1.07	M	S	$M_p$	M	$M_p$	ただし、実験値、Pro-wcではMと $M_p$ の区別はわからないためすべてM に統一した。	
Bt0-SD390	1.03	1.21	0.94	0.96	M	S	S	M	M		
Bt2-SD390	1.20	1.13	0.94	0.94	S	S	S	S	M		
Ct0	0.97	0.97	1.03	1.03	M	$M_p$	$M_p$	M	M		
Ct1	1.03	1.03	1.07	1.07	M	$M_p$	$M_p$	M	M		
Ct2	0.99	0.99	0.99	0.99	M	$M_p$	$M_p$	M	$M_p$		
Dt0	0.84	0.84	0.88	0.89	M	$M_p$	$M_p$	M	M		
Dt1	0.94	0.94	0.98	0.96	M	$M_p$	$M_p$	M	M		
Dt2	1.00	1.00	1.00	1.00	M	$M_p$	$M_p$	M	$M_p$		

に単純に帯鉄筋降伏を破壊荷重とすることはできないと考えられる。そこで今回は、後述する”Pro-wc”による解析で破壊と判定された変位を破壊変位とし、荷重-変位関係からその値に対応する荷重を実験の破壊荷重とした。その結果を表-1に示した。

実験でほとんどが最終的には斜めひび割れを伴いながら圧壊していたが、せん断力により斜めひび割れが広がり変形が大きくなることで圧壊に至ったのか、曲げの作用により圧壊に至ったのかが明確にはわからず破壊モードの判断が非常に難しい。そこでどちらの破壊が先行して破壊したのかの判断材料として下記のように鉄筋降伏に着目した。

#### ①曲げ破壊

初めに主鉄筋の降伏が起こり終局に至る破壊

#### ②せん断破壊

初めに補強筋の降伏が起こり終局に至る破壊

上記の定義の妥当性について検討する。せん断破壊と判定された At0, せん断の影響を大きく受けるが曲げ破壊と判定された Bt0, 曲げ破壊と判定された Dt0 の3つの最終ひび割れ状況を比べたのが図-3である。斜めひび割れに注目すると Bt0 と Dt0 は斜めひび割れが発生しているもののあまりひび割れ幅が進展していない。しかし、At0 は斜めひび割れ幅がほかの2つに比べて大きく卓越していることがわかる。このことから今回の実験の破壊定義はせん断破壊と曲げ破壊を妥当に表していると考えられる。

### 3.3 既往の式との比較

実験値を示方書準用式(示方書式 $\times(0.75+1.4/a/d)$ )と修正圧縮場理論を基にしたカナダの設計式(以下, CSA)<sup>3)</sup>と比較した結果を表-1に示した。この2式は帯鉄筋降伏を破壊としているので実験値の破壊荷重とは多少のずれが見られる。その中で、軸引張力による耐力減少について示方書準用式はかなり過大評価しているが、CSAではその影響を少なく見積もっている。また、せん断スパン比の影響はCSAでは実験値と比べて小さめに予測していることがわかる。

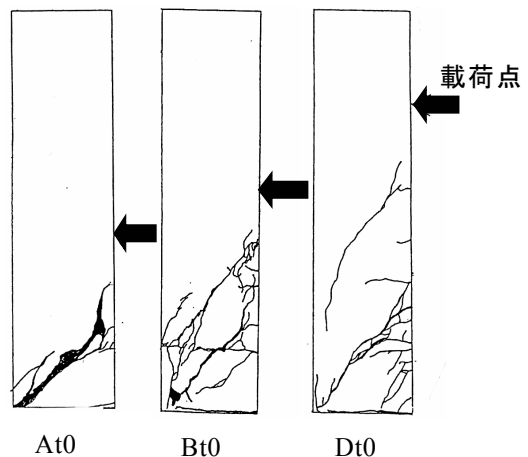


図-3 ひび割れ状況図の比較

一方、破壊モードについてはCSAが示方書準用式より正確に予測していることがわかる。

## 4 解析方法と解析結果

### 4.1 解析方法

実験を行ったすべての供試体について2種類の2次元有限要素法汎用プログラムWCOMD(“Pro-wc”と記す)およびDIANA(“Pro-DA”と記す)を用いて解析を行った。軸引張力は荷重制御で、水平力は変位制御で加力した。実験供試体の要素分割図を図-4に示した。Pro-wcとPro-DAの解析結果の一例が図-5であり、双方ともに実験値をよく表しているが、以降の解析は破壊基準が明確であるPro-wcを用いることとした。

### 4.2 解析結果

今回の解析結果を表-1に示した。帯鉄筋なし供試体では実験による破壊定義と解析による破壊定義が違ってもかかわらず破壊荷重、破壊変位ともに実験と解析が良く一致していた。

実験値  $P_{exp}$  と解析値  $P_{WC}$  の破壊荷重の相違を判断するために  $P_{exp}/P_{WC}$  を求めると、帯鉄筋なしでは平均 0.97, 標準偏差 0.070, 変動係数 7.24%, 帯鉄筋ありでは平均 1.00, 標準偏差 0.056, 変動係数 5.66%となった。

破壊モードは、解析では何が原因で破壊に至ったかを明示してくれることから最終破壊状況から破壊モードを判断した。At1 と Bt1 のみ実

験と破壊モードが異なったが、それぞれに対して軸引張力  $1\text{N/mm}^2$  付近で改めて解析すると At1 はせん断, Bt1 は曲げになった。このことからこれは解析誤差であると考えられる。

## 5 算定式の検討

### 5.1 破壊耐力式の算定方法

Pro-wc が良く実験値を評価していることから Pro-wc により実際の状況を正しく再現できると考えられる。そこで Pro-wc でパラメータを増やし、解析的に破壊耐力式を算定ことにする。なお、曲げとせん断では破壊形式、パラメータが及ぼす影響の意味がまったく異なることから1つの式では表すことができないと考えられる。このため、破壊耐力式算定の際に曲げとせん断の耐力式は別々に与えることにする。

せん断破壊においては帯鉄筋ありとなしの場合は、帯鉄筋の影響からそれぞれのパラメータが耐力に及ぼす影響は異なると考えられる。このため今回別々の式として与えることにする。

曲げ破壊においては一般的には純曲げ理論で曲げ耐力を算定するが、せん断の影響が大きい曲げ破壊ではこの純曲げ理論が適用できないと考えられる。このためせん断の影響が比較的大きいところでの曲げ耐力式と純曲げ理論の式を別々に考えることにする。

すなわち、今回の解析において、帯鉄筋なしのせん断耐力式、帯鉄筋ありのせん断耐力式、せん断の影響が比較的大きい曲げ耐力式の3つの式を提案し、純曲げ理論とそれぞれを比較して最小のものをその時の破壊耐力、破壊モードであると定義する。なお、せん断耐力式の形としては示方書に準じて積の形で表すことにする。

$$V = m \cdot x^a \cdot y^b \cdot z^c \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

V : 破壊耐力 x, y, z : パラメータの種類  
a, b, c, m : 定数

これらの定数は1つのパラメータのみを変数とし、その他のパラメータは定数として解析を進めることで1つ1つのパラメータの影響度を考

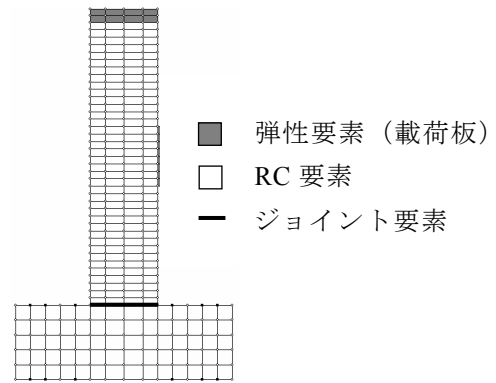


図-4 要素分割図

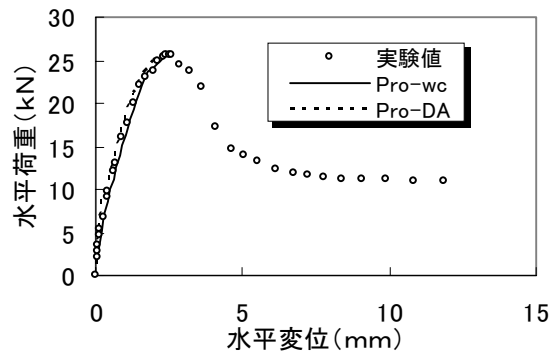


図-5 水平変位—水平荷重関係 (C0)

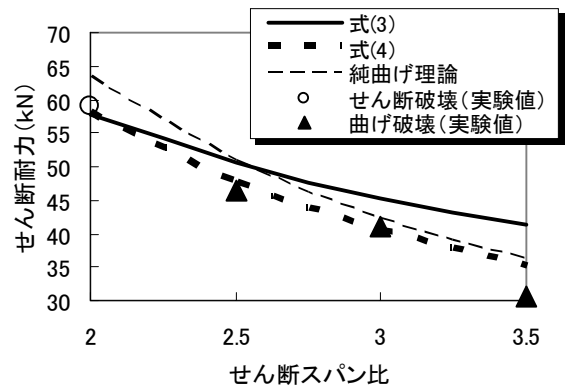


図-6 提案式の比較 (軸引張力  $0\text{N/mm}^2$ )

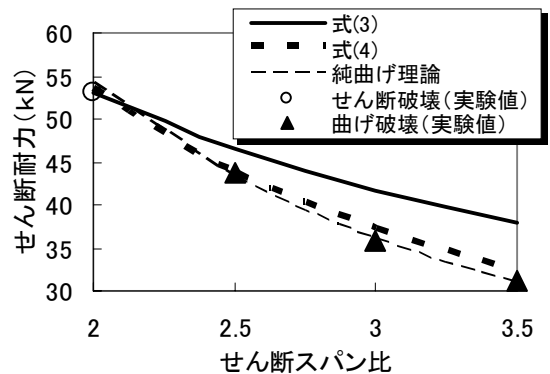


図-7 提案式の比較 (軸引張力  $2\text{N/mm}^2$ )

慮した。次にパラメータの影響度の値を使いやすい形にするために Pro-wc から厳密に求めた

数字を丸め、最後に実験値と解析値がほぼ同一のときの値を代入して  $m$  を算定した。

## 5.2 破壊耐力式の提案と考察

5.1 で示した方法で求めた式を下に示した。

### ①せん断耐力式（帯鉄筋なし）

$$V_s = 0.255 \cdot \beta_1 \beta_c \beta_n a / d^{-0.7} b_w d \quad (2)$$

ただし、

$$\beta_1 = A_t f_{yt}^{0.15} f_t^{0.1}, \quad \beta_c = f'_c{}^{0.1} f_t^{0.8}, \quad \beta_n = 1 - \sigma_n / 12$$

### ②せん断耐力式（帯鉄筋あり）

$$V_s = 0.134 \cdot \beta_1 \beta_c \beta_n \beta_a / d^{-0.6} b_w d \quad (3)$$

ただし、

$$\beta_1 = (A_t f_{yt})^{0.3}, \quad \beta_c = f'_c{}^{0.2} f_t^{0.3}, \quad \beta_n = 1 - \sigma_n / 25, \\ \beta_a = (A_t f_{yt})^{0.15} s^{-0.5}$$

### ③曲げ耐力式

$$M = 2.22 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_1 \beta_c \beta_n a / d^{-0.9} b_w d \quad (4)$$

ただし、

$$\beta_1 = (A_t f_{yt})^{0.85}, \quad \beta_c = f'_c{}^{0.2}, \quad \beta_n = 1 - \sigma_n / 25$$

なお、(2)～(4)式の適用範囲は  $\sigma_n \leq f_t$  ,  $2.0 \leq a/d \leq 3.5$  とし、単位は上式すべて mm, N を使用する。

上記3式と純曲げ理論から算定した破壊荷重の最小値を表-1に示した。 $P_{exp}/P_{cal}$ の値は帯鉄筋なしでは平均 1.00, 標準偏差 0.072, 変動係数 7.25%, 帯鉄筋ありでは平均 1.00, 標準偏差 0.055, 変動係数 5.50%となった。

次に破壊モードについて検討する。帯鉄筋ありの場合の基本実験条件で軸引張力  $0N/mm^2$  と  $2N/mm^2$  について提案式で算定した結果を図-6, 図-7に示した。図-6と図-7を比較すると軸引張力が大きいほど明らかに純曲げに近づいていくと判断できる。田村ら<sup>1)</sup>の研究でも軸引張力が大きいほどせん断から曲げにシフトすると述べておりこれと一致している。また、表-1で純曲げと判断された実験供試体はすべて斜めひび割れが発生しており、見た目の破壊状況からはせん断に近いように思える。しかし、これらの供試体に対して実験値と純曲げ理論から導かれる曲げ耐力を比べると良く一致している。さらに、せん断破壊とせん断の影響が比較的大きい曲げ破壊との境目についても実験値の破壊

モードと良く一致している。これらよりこの式による破壊モードの算定は正しいと考えられる。

以上のことから今回提案した式は破壊荷重だけでなく、破壊モードも正確に判断できると考えられる。

## 6 まとめ

軸引張力を受ける RC 柱部材の実験とそれに対する有限要素法解析から明確になった事項をまとめると、以下の通りである。

- (1) 帯鉄筋ありの供試体の破壊モードは主鉄筋、帯鉄筋の降伏が先行した方を曲げ破壊、せん断破壊とすることで判断できた。
- (2) 軸引張力の影響は示方書準用式では過大評価され、CSA ではあまり考慮されていなかった。
- (3) 破壊モードは CSA では比較的適切に予測できた。
- (4) Pro-wc はせん断、曲げにかかわらず破壊耐力、破壊モードの双方とも実験値と良く一致していた。
- (5) 解析をもとにした提案式においても今回の供試体緒元では破壊耐力、破壊モードの双方が実験値と良く一致していた。

なお、本研究は科学研究費補助金基礎研究 (A) (1) (代表者 埼玉大 町田篤彦教授) をもとに実施したことを附記する。

## 参考文献

- 1) 田村隆弘, 重松恒美, 中野修治: 軸方向引張り力を受ける RC 梁のせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.2, No.2, pp.153-160, 1991
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編), 土木学会, pp.60-65, 1996
- 3) CSA Standards: A23.3-94 Design of Concrete Structures, Canadian Standards Association 178 Rexdale Boulevard Rexdale Ontario Canada M9W 1R3, pp.55-62, 1994