論文

軸力と曲げモーメントを受ける RC 部材のせん断耐力算定法について

飯塚 信太郎^{*1}・関 博^{*2}

要旨:軸引張力と曲げモーメントを受ける RC 部材に関して軸引張応力、せん断スパン比を パラメータとして 12 体の供試体について実験を行った。得られた実験結果を基に有限要素法 を用いて解析を行った結果、プログラムの妥当性を示すことができたので、軸圧縮力をパラ メータに加え解析を行い、せん断スパン比と軸力の相互作用を検討した。解析結果から軸力 を受ける RC 部材のせん断耐力式を提示した。

キーワード:軸引張力、軸圧縮力、有限要素法

1. はじめに

せん断破壊の研究に関し、曲げモーメントとせ ん断力が同時に作用する場合の研究事例は極め て多い。RC部材には曲げモーメントと軸力の組 み合わせ荷重作用を受けるものもあり、せん断耐 力に対して軸力は支配的パラメータの一つと考 えられる。曲げモーメントと軸圧縮力が作用する 場合に関する研究は多々ある。近年では、山谷¹⁾ らによって広範囲の a/d において軸圧縮力を受け るRC梁部材の実験的研究が行われており、a/dの 効果を含めたせん断耐力式が提案されている。し かし、曲げモーメントと軸引張力を組み合わせる 研究、実験例は少なく、軸引張力まで包括したせ ん断耐力式の精度は曲げ耐力式と比較するとか なり劣ると思われる。その中にあって田村²⁾らは 軸引張力を受ける RC 梁部材について軸引張力、 せん断スパン比等を変化させた実験を行い、貴重 なデータを提示している。しかし、軸引張力、軸 圧縮力両方に対して検討した例は少ない。そこで 本研究の目的として、曲げモーメントと軸引張力 ないし軸圧縮力を受ける RC 部材のせん断耐力を 主に解析により包括的に検討し、せん断補強鉄筋 を有していない部材を対象とした。実験に関して は、曲げモーメントと軸引張力を受ける RC 部材 に関して実施した。得られた実験結果を基に有限 要素法を用いて解析を行った結果、プログラムの 妥当性を示すことができたので、軸圧縮力をパラ

メータに加え数値解析を行い、せん断スパン比と 軸力の相互作用を検討した。解析結果から軸力を 受ける RC 部材のせん断耐力式を提示した。

2. 実験方法

2.1 実験条件および供試体

せん断補強されていない RC 部材のせん断耐 力は、コンクリート圧縮強度、引張鉄筋比、有 効高さ、軸力、せん断スパン比(以下、a/d)が主 要なパラメータと考えられる。これらの中で、 本研究ではa/dと軸引張力をパラメータとした。 a/d については 2.0、 2.5、 3.0、 3.5 の 4 種類、 軸 引張応力 「に関しては 0、1.0、2.0N/mm² の 3 種類、計 12 体の供試体である。供試体は図-1 に示すような帯鉄筋のない RC 柱を用いた。柱 部分の断面形状は幅 120mm×高さ 180mm、有 効高さ 160mmの複鉄筋長方形断面である。使 用した鉄筋は D13(SD345)であり、引張鉄筋比 pwは1.98%である。軸引張力を導入するため供 試体上部にはU字型鉄筋を打設時に埋め込んだ。 U字型鉄筋近傍には端部破壊の防止およびU字 型鉄筋の確実な定着を目的として帯鉄筋 (SR235、D6)を配置した。なお、供試体の種類 および材料諸元を**表-1**に示した。

2.2 載荷方法

載荷は図-2 に示す載荷装置を用いて行った。 最初に軸引張力をセンターホールジャッキによ

*1 西日本旅客鉄道株式会社 工修 (正会員) *2 早稲田大学教授 理工学部 土木工学科 工博 (正会員)



図 - 1 供試体概要図

り導入し、軸引張力が所定の値に達した後、軸 引張力を保持し、水平荷重を油圧ジャッキによ り部材が破壊するまで漸増させた。水平荷重に より柱が傾いた場合でも常に軸引張力が鉛直に 作用させるため、フレーム上部に設置した移動 用鋼棒により柱の変位にあわせてセンターホー ルジャッキの位置を移動させた。なお、水平荷 重を載荷する際に用いた載荷板は幅12cm×高 さ2cmの鋼板である。

2.3 実験結果と考察

実験結果を表-1に示した。実験による荷重変 位関係から明確な最大点が認められたので、最 大荷重を破壊荷重と考え実験値 V_{exp}と定義した。 破壊モードは試験したすべての供試体で引張主 鉄筋が降伏する以前に斜めひび割れの発達によ って破壊するせん断破壊であった。図-3から軸 引張力の存在により斜めひび割れと柱中心部線 のなす角度は大きくなる傾向がみられたが、ひ び割れ性状自体に大きな変化は見られなかった。 実験値 V_{exp}と既往の設計式による算定値 V_{cal-1} との比較を行う。V_{cal-1}の算定にあたっては、土

図-2 載荷装置



図 - 3 ひび割れ状況図の比較

木学会示方書³⁾における棒部材せん断耐力式
(以下、JSCE)を用いたが、a/dの影響に関しては
二羽ら⁴⁾によって提案されている次式を用いて
修正した。

$$\beta_{a/d} = 0.75 + \frac{1.4}{a/d}$$
(1)

図-4は a/d における V_{exp}/V_{cal-1}の関係を示した。

供試体名	a/d	σ_n	コンクリート			主鉄筋				V	V	V		
			f _c	f_t	Ec	pw	fy	Es	M_o/M_u	• exp	v cal-1	v cal-2	V_{exp}/V_{cal-1}	V_{exp}/V_{cal-2}
		(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(%)	(N/mm^2)	(N/mm^2)		(KN)	(KN)	(KN)		
A0	2.0	0.0	26.0	2.4	24.7	1.98	364	179	0.000	34.0	31.1	32.6	1.09	1.04
A1	2.0	1.0	26.5	2.2	25.8	1.98	373	170	-0.047	34.0	25.4	29.2	1.34	1.17
A2	2.0	2.0	26.5	2.2	25.8	1.98	373	170	-0.101	30.2	18.6	29.1	1.62	1.04
B0	2.5	0.0	26.5	2.2	25.8	1.98	373	170	0.000	28.7	28.2	28.3	1.02	1.01
B1	2.5	1.0	26.0	2.2	25.8	1.98	373	170	-0.047	28.4	22.8	25.1	1.24	1.13
B2	2.5	2.0	26.0	2.4	24.7	1.98	364	179	-0.108	25.5	16.0	27.3	1.59	0.93
C0	3.0	0.0	26.5	2.2	25.8	1.98	373	170	0.000	25.7	26.2	25.7	0.98	1.00
C1	3.0	1.0	26.5	2.2	25.8	1.98	373	170	-0.047	20.5	21.3	22.8	0.96	0.90
C2	3.0	2.0	26.5	2.2	25.8	1.98	373	170	-0.101	20.1	15.6	22.5	1.29	0.89
D0	3.5	0.0	26.0	2.4	24.7	1.98	364	179	0.000	26.4	24.6	24.4	1.07	1.08
D1	3.5	1.0	26.5	2.2	25.8	1.98	373	170	-0.047	22.2	20.2	23.1	1.10	0.96
D2	3.5	2.0	26.0	2.4	24.7	1.98	364	179	-0.108	22.4	14.0	23.4	1.59	0.96

表 - 1 供試体諸元および最大耐力

a/d: せん断スパン比 σ_n:軸引張応力 E_c: ヤング係数(コンクリート) pw: 引張鉄筋比(=100A_s/bd) M_u: 終局曲げモーメント(計算値) V_{esp}: 実験値 f_c:コンクリート圧縮強度 Es:ヤング係数(主鉄筋) V_{cal-1}:JSCEと式(1)による計算値

f_t:コンクリート引張強度 M_o:デコンプレションモーメント V_{cal-2}:FEMによる解析値

軸引張力が作用しない場合は、a/dにおける V_{exp}/V_{cal-1} の値は 1.0 に近い値をとり、 V_{cal-1} が ほぼ妥当な評価をしていることがわかる。また、 同じa/dで比較した場合では V_{exp}/V_{cal-1} の値は軸 引張応力が大きくなるにつれ大きくなる傾向 が見られた。JSCE では軸力が作用する場合、 **式**(2)、**式**(3)の影響項を用いている。

$$\beta_{n} = 1 + 4 \frac{M_{o}}{M_{u}} (N'_{d} < 0)$$
 (2)

$$\beta_{n} = 1 + 2 \frac{M_{o}}{M_{u}} (N'_{d} \ge 0)$$
 (3)

ここで

M_u:終局曲げモーメント

M_o: デコンプレションモーメント

式(2)で表現される軸引張力を受ける場合の影響項は、研究事例が少ないことを理由に軸引張 力による不利な影響を軸圧縮力の2倍とし、安 全側にしている。式の性質上、軸引張力が大き くなるにつれ安全側に移行することが想定で きる。

3. 解析

3.1 解析概要

実験を行ったすべての供試体に関して二次元 有限要素法プログラム WCOM を用いて解析を 行った。コンクリート部に関しては鉄筋比と引 張硬化・軟化により表現されるコンクリート要 素を、柱部分とフーチング部の接合部には鉄筋





図 - 5 要素分割図

比と定着長さで与えられる RC ジョイント要素 を用いた。軸引張力、および水平荷重を導入す るための鉄板および載荷板に関しては弾性要素 を用いた。軸引張力は荷重制御に、水平荷重 は変位制御として解析した。図-5 に解析で用 いた要素分割および要素概要を示した。

3.2 解析結果

解析による破壊モードは供試体全てでせん断破壊となり実験結果と一致した。また、 破壊荷重としては解析終了時までにおける最 大荷重とし、 V_{cal-2} とした。実験と解析による 荷重変位関係の一例を $\mathbf{26}$ に示す。 V_{exp}/V_{cal-2} の値は表-1に示す通りであり平均 1.01、標 準偏差 0.08 となり高い精度で予測できる結 果となった。

3.3 軸引張力と a/d に関する検討

解析は実験値を正しく評価でき、実際の現 象を正しく再現することができると考えられ る。このため、a/dの範囲を広げ解析を行い、 軸引張力とa/dについて検討した。

解析を行う上で実験時の代表値として供 試体 C シリーズでの値を用いた。図-4 に示し たように軸引張力が作用しない場合には V_{exp}/V_{cal-1} は実験値を良く予測しており、軸引 張力=0 とした時の V_{cal-1} と V_{cal-2} の比較を示 したものが図-7 である。なお、a/d の範囲と して解析上でせん断破壊と判定された a/d = 2.0~5.0 とした。図-7より V_{cal-1} と V_{cal-2} はほ ぼ同じ値であり実験外の範囲においても解析 が有効であると思われる。この範囲において、 軸引張力を受ける場合の影響項 n-cal を解析 的に算出した。 n-cal の算出に当たっては、 同一の a/d において軸引張力が作用する場合 の解析値を軸引張力が作用しない場合の解析 値で除した。なお、軸引張応力の範囲は実験 と同じ条件である 0~2N/mm²の範囲とした。 M_o/M_u を横軸に、各 a/d における $_{n-cal}$ の値を プロットしたものが、図-8 である。a/d の違 いによる影響項 n-cal を考え、線形近似する と軸引張力に関する影響項として式(4)が得 られる。

$$\beta_{n-cal} = 1.0 + 1.23 \frac{M_o}{M_u}$$
 (4)



ただし、 2.0≤a/d≤5.0 かつ - 0.10≤M_o/M_u<0 の範囲とする。

3.4 軸圧縮力と a/d に関する検討

軸圧縮力と a/d について検討する。 ´n は 0~ 5.0N/mm² の範囲とし、a/d は軸引張力の場合と 同じく 2.0~5.0 の範囲を考慮した。 n-cal を算出 した時と同様の手法を用いて軸圧縮力に関する 影響項 ´n-cal を算出し、各 a/d における ´n-cal の値を**図-9**に示した。

式(4)における軸引張力の影響項と同様に ^{´n-cal}は M₀/M_uの増加と共に大きくなっている。 しかし、a/d によりその傾きが大きく変わる傾向 が解析結果から見られた。式(3)における β,は、 材料諸元が同じ場合には、軸圧縮力のみに依存 する。しかし、a/d によって 。が変化すること から、軸圧縮力と a/d の間で相互作用が存在す ると考えられる。このことは山谷らによる実験 結果と同様の傾向である。a/d と軸圧縮力の相互 作用を考慮するため、まず各 a/d について線形 近似しその傾きαを算出した。図-10 は横軸を a/d とし、各 a/d での傾きαの値をプロットした ものである。2.0 から 3.0 の間では、a/d が大き くなるとαの値は増加し、a/d=3.0以上ではa/d の増加とともにαの値は減少している。a/d=3.0 を境に二つの領域に分け a/d の関数とすると次 の2式が得られた。

$$\alpha_1 = 0.41 \frac{a}{d} + 2.73 \tag{5}$$

$$\alpha_2 = -1.27 \frac{a}{d} + 7.66 \tag{6}$$

式(5)、式(6)を用いると軸圧縮力に関する影響 項は次式となる。

$$2.0 \le a / d < 3.0 \, \text{m} \supset 0 \le \frac{M_o}{M_u} \le 0.15 \, \text{のとき}$$
$$\beta'_{n-call} = 1 + \left(0.41 \frac{a}{d} + 2.73 \right) \frac{M_o}{M_u} \tag{7}$$

$$3.0 \le a/d \le 5.0$$
 かつ $0 \le \frac{M_o}{M_u} \le 0.15$ のとき
 $\beta'_{n-cal2} = 1 + \left(-1.27\frac{a}{d} + 7.66\right) \frac{M_o}{M_u}$ (8)



図-9 各 a/d における 'n-calの値



図 - 10 と a/d の関係

式(7)および式(8)は、a/d の変化による破壊モ ードの変化を示していると思われる。すなわち、 式(8)における a/d の適用範囲の上限値付近では 曲げの影響が大きいため軸圧縮力によってせん 断耐力が上昇しにくいことを、式(8)における中 間領域から式(7)との境界領域にかけては軸圧 縮力が有効に働き、斜めひび割れ発生が抑制さ れ耐力が大きくなることを表している。式(7) の区間に関しては、破壊モードが徐々にせん断 圧縮破壊に移行する途上領域であると考えられ る。

4. せん断耐力式の検討

軸力に関する影響項に関しては前節までに検 討した。これらを本研究における実験、および 既往の実験に適用検証する。耐力算定に関して は、軸力以外の影響項に関しては JSCE と式(1) にしたがって算出した。軸引張力が作用する場 合では、式(4)の適用範囲である田村らによる実 験の供試体17体と本実験における供試体8体の 計25体を、軸圧縮力が作用する場合は山谷らの 実験における 27 体の供試体について検証を行 った。提案式による算定値 V_{cal-3}、検証する実験 値を V'exp、とし V'exp /Vcal-3 を求めた。軸引張力 を受ける場合での V[']exp /Vcal-3の平均値は、平均 0.99、標準偏差は 0.13 となり、JSCE による V'exp /V_{cal-1}の平均 1.36、標準偏差 0.19 に比べ精度の 良いものとなった。また軸圧縮力を受ける場合 でも V'exp /Vcal-1 の平均 1.15、標準偏差 0.15 に対 し V'exp /Vcal-3の値は平均 1.00、標準偏差 0.12 と なった。提案した式は標準偏差が多少大きいが、 既往の設計式である V_{cal-1} より精度よく予測で きることがわかった。

5.まとめ

本研究では、軸引張力を受ける RC 柱に関して 実験を行い、実験結果を既往の設計式、有限要 素法による解析と比較検討した。軸圧縮力を受 ける範囲にも広げ、せん断スパン比と軸引張力 ないし軸圧縮力の関係について包括的に検証し た。本実験および解析の範囲で明確になった点 をまとめると以下のようになる。

- (1) 既往の設計式(JSCE)では軸引張力が大きく なるにつれ安全側に評価する。
- (2) 解析結果において軸引張力と a/d の相互作 用はそれほど大きいものではない
- (3) 解析結果において軸圧縮力と a/d の相互作 用が認められた
- (4) 解析から得られた提案式は適用範囲内で既 往の設計式より高い精度で予測できた。

本研究の段階では、軸圧縮力に対しては解析 によりせん断耐力式を提示した。今後は既往の 実験を含めて軸力の影響項をさらに検討するこ







図 - 12 V_{cal-3}とV'_{exp}(軸圧縮力)

とが課題である。

参考文献

1)山谷敦、檜貝勇、中村光:軸方向圧縮力をけ る RC 梁のせん断挙動に関する実験的研究、土木 学会論文集、N0.697/V 54、pp.143-159、2002.2 2)田村隆弘、重松恒美、原隆、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、 pp.153-160、1991.7

3) 土木学会:コンクリート標準示方書(構造性 能照査編)、土木学会、pp.67-72、2002

4) 二羽淳一郎、山田一宇、横沢和夫、岡村甫: せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度 再評価、土木学会論文集、NO.372/V 5、pp.167 -176、1986.8