

軸力、曲げおよびねじりをうけるRC部材の破壊モードに関する研究

オリエンタル建設㈱ 正会員 工修 ○浦川 洋介  
九州大学大学院 教授 正会員 工博 大塚 久哲  
九州大学大学院 白石 昭寿

1. はじめに

RC部材にねじりと曲げが作用する場合、载荷状態が例えば、純ねじりから純曲げモードに変化するとともに、RC部材の破壊モードは異なってくるのが分かっている<sup>1)</sup>が、その境界点を実験的に判断したものは少ない。また、相関曲線を作成する場合、立体トラス理論による理論式と斜め曲げ理論式のいずれを用いるかの判断が必要であり、両理論式の適用範囲を決定することが重要である。そこで、本研究では、軸力、曲げおよびねじりの複合応力状態におけるRC部材の相関特性において、ねじりが支配的な領域と曲げが支配的な領域の境界付近に着目し、矩形断面を有するRC柱を対象に、複合荷重による交番载荷実験を行った。

2. 破壊メカニズムの概要

ねじり耐力を評価する理論式は、斜め曲げ理論によるものと立体トラス理論によるものとに大別される。前者は、主として実験的研究により導かれたものであり、コンクリート部材のねじり破壊が軸線とある角度をなす面における曲げ破壊であるという考えに基づいている。後者は、ねじりひびわれが発生したコンクリート部材を一種の立体的なトラスと仮定し、圧縮場理論を適用するものである。

また、ねじりと曲げの複合荷重が作用する場合の相関関係についても、既往の研究<sup>1), 2)</sup>よりいくつかの相関曲線が示されているが、コンクリート標準示方書では2次曲線をベースに実際の設計上の適用を考慮した相関曲線を示している<sup>3)</sup>。この際、ねじり耐力としては、先述した2つの理論(斜め曲げ理論と立体トラス理論)によるねじり耐力のうち、安全側の観点から小さい方の値を用いることとしている。しかしながら、斜め曲げ理論と立体トラス理論では想定している破壊メカニズムが異なり、ねじりと曲げの载荷比率により曲げが卓越する破壊状態とねじりが卓越する破壊状態およびその境界状態が存在するものと考えられる。なお、泉らの研究<sup>2)</sup>では、ねじりが支配的な範囲においては立体トラス類似による理論式、曲げが支配的な範囲においては斜め曲げによる理論式を誘導している。

一方向単調载荷を行った既往の研究<sup>2)</sup>によると、ねじりが支配的な領域とは、終局時に部材の全面にねじりによるひびわれが発生する状態であり、曲げが支配的な領域とは、曲げによる圧縮応力により部材にひびわれが発生しない面が存在する状態としている。各载荷比率における状態を最外縁に位置する主鉄筋ひずみで示した場合、図-1のように表せる。この図より、ねじりが支配的な領域と曲げが支配的な領域の境界状態とは、最外縁に位置する主鉄筋に対し、ねじりによる引張ひずみを曲げによる圧縮ひずみが相殺した状態と考えることができる。一方、純ねじりの場合には帯鉄筋の降伏により最大耐力に至ることが分かっている。このことから、ねじりが卓越する範囲から曲げが卓越する範囲へ载荷比率が変化することにもない、帯鉄筋が降伏しなくなる载荷比率が存在することになり、そこに境界状態が存在するとも考えられる。

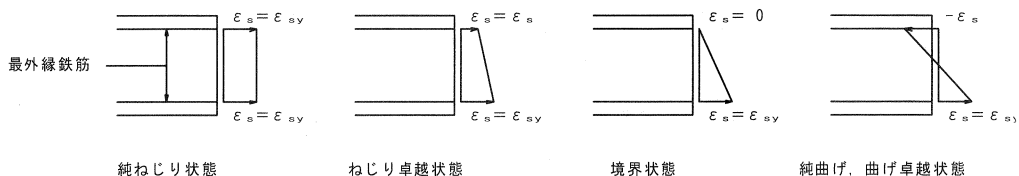


図-1 最外縁主鉄筋のひずみ分布

本研究では、ねじりが支配的な領域と曲げが支配的な領域の境界状態を把握するために、主鉄筋のひずみおよび帯鉄筋の降伏に着目した検討を行った。

3. 実験概要

(1) 実験供試体

供試体は、400mm×400mmの矩形充実断面を有するRC柱部材であり、部材長さは1600mmである。載荷位置での局所的な破壊を避けるため、両端にフーチングを設けフーチングと載荷装置をPC鋼棒にて固定している。載荷は、降伏までは目標載荷比率を一定に保つこととし、降伏以降は、降伏時の変位量の倍数で交番載荷を行った。実験概要の詳細については、文献4)、5)を参照されたい。実験供試体の外形寸法および載荷状況を図-2に示す。

(2) 検討ケース

本研究においては、軸力、帯鉄筋間隔、ねじりと曲げの載荷比率をパラメータとし、表-1に示す全30体の供試体について実験を行った。軸力は、0.0 ~ 4.0 N/mm<sup>2</sup> (設計基準強度の0 ~ 10%)、帯鉄筋間隔は、30mmおよび60mm (帯鉄筋比は、1.16%および0.58%)とした。目標載荷比率 $\Delta M_t / \Delta M_b$ はねじりモーメントと曲げモーメントの増加比率であり、純ねじりから純曲げまで、ねじり卓越、曲げ卓越およびその中間の載荷比率について実験を行った。また、コンクリートは設計基準強度40 N/mm<sup>2</sup> (早強)、鉄筋はSD295とし、軸方向鉄筋にD13、帯鉄筋にD6を用いた。表-2、表-3に使用材料の強度試験結果を示す。

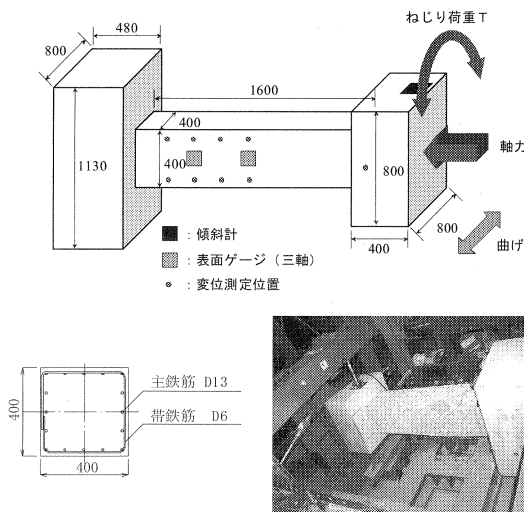


図-2 供試体寸法および載荷状況

表-1 検討ケース

ケース No.	軸力 (N/mm <sup>2</sup> )	帯鉄筋間隔 (mm)	目標載荷比率	
			$\Delta M_t / \Delta M_b$	載荷タイプ
1	0.0	30	- (90°)	純ねじり
2			1.73 (60°)	ねじり卓越型
3			1.00 (45°)	中間型
4			0.78 (37.5°)	中間型II
5			0.58 (30°)	曲げ卓越型
6			- (0°)	純曲げ
7	2.0	30	- (90°)	純ねじり
8			1.73 (60°)	ねじり卓越型
9			1.00 (45°)	中間型
10			0.78 (37.5°)	中間型II
11			0.58 (30°)	曲げ卓越型
12			- (0°)	純曲げ
13	4.0	30	- (90°)	純ねじり
14			1.73 (60°)	ねじり卓越型
15			1.00 (45°)	中間型
16			0.78 (37.5°)	中間型II
17			0.58 (30°)	曲げ卓越型
18			- (0°)	純曲げ
19	2.0	60	- (90°)	純ねじり
20			1.73 (60°)	ねじり卓越型
21			1.00 (45°)	中間型
22			0.78 (37.5°)	中間型II
23			0.58 (30°)	曲げ卓越型
24			- (0°)	純曲げ
25	4.0	60	- (90°)	純ねじり
26			1.73 (60°)	ねじり卓越型
27			1.00 (45°)	中間型
28			0.78 (37.5°)	中間型II
29			0.58 (30°)	曲げ卓越型
30			- (0°)	純曲げ

表-2 コンクリート材料強度

ケース No.	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
1	6	33.4	3.9	2.28 × 10 <sup>4</sup>
2	28	47.6	4.3	3.11 × 10 <sup>4</sup>
3	35	51.1	4.0	3.04 × 10 <sup>4</sup>
4	26	48.9	3.8	2.49 × 10 <sup>4</sup>
5	31	43.2	3.6	3.61 × 10 <sup>4</sup>
6	7	32.8	2.8	2.14 × 10 <sup>4</sup>
7	6	31.9	3.4	2.28 × 10 <sup>4</sup>
8	62	50.6	3.9	3.23 × 10 <sup>4</sup>
9	19	45.4	3.2	2.72 × 10 <sup>4</sup>
10	13	48.4	4.0	2.68 × 10 <sup>4</sup>
11	41	54.0	3.9	3.39 × 10 <sup>4</sup>
12	31	51.6	3.5	3.18 × 10 <sup>4</sup>
13	11	35.3	4.1	2.39 × 10 <sup>4</sup>
14	32	49.3	3.4	3.01 × 10 <sup>4</sup>
15	33	50.4	4.0	3.55 × 10 <sup>4</sup>
16	28	49.0	3.7	3.61 × 10 <sup>4</sup>
17	49	47.5	3.7	3.16 × 10 <sup>4</sup>
18	6	40.6	2.9	2.46 × 10 <sup>4</sup>
19	10	34.8	3.4	2.30 × 10 <sup>4</sup>
20	26	48.0	3.5	2.98 × 10 <sup>4</sup>
21	20	47.9	4.0	3.32 × 10 <sup>4</sup>
22	20	50.6	3.7	2.82 × 10 <sup>4</sup>
23	18	41.5	3.3	3.15 × 10 <sup>4</sup>
24	15	46.5	3.6	3.38 × 10 <sup>4</sup>
25	15	45.7	4.2	2.73 × 10 <sup>4</sup>
26	38	60.4	4.8	3.66 × 10 <sup>4</sup>
27	27	35.2	3.4	3.00 × 10 <sup>4</sup>
28	31	49.8	3.6	3.37 × 10 <sup>4</sup>
29	37	51.6	3.8	3.10 × 10 <sup>4</sup>
30	6	41.1	3.3	2.62 × 10 <sup>4</sup>

表-3 鉄筋の材料強度

鉄筋径	降伏荷重 P <sub>y</sub> (kN)	降伏応力 σ <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ ε <sub>y</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
D6	10.2	322.0	1823	1.77 × 10 <sup>5</sup>
D13	43.1	340.4	1885	1.80 × 10 <sup>5</sup>

4. 実験結果

(1) 荷重-変位関係

実験結果として、軸力  $4.0\text{N/mm}^2$ 、帯鉄筋間隔  $30\text{mm}$  および軸力  $4.0\text{N/mm}^2$ 、帯鉄筋間隔  $60\text{mm}$  について、載荷比率が中間型の場合のねじりと曲げの荷重-変位関係を図-3に示す。図にはそれぞれ、純ねじりおよび純曲げの荷重-変位関係も比較のために併記している。複合荷重時(中間型)と純荷重時(純ねじり、純曲げ)の両者について比較すると、最大耐力については、コンクリートの実圧縮強度にもよるが、複合荷重時の方が純荷重時に比べ同程度か小さくなる傾向にある。また、荷重-変位関係の骨格曲線については、ほぼ相似形となっている。

(2) ひびわれ図

実験結果として、軸力  $4.0\text{N/mm}^2$ 、帯鉄筋間隔  $30\text{mm}$  のケースの最大荷重時におけるひびわれ図を図-4に示す。純ねじりでは  $45^\circ$  方向のひびわれが部材全面で交差するように入るのに対し、純曲げでは水平方向のひびわれが発生し、基部側に損傷が集中している。また、載荷比率がねじり卓越側から曲げ卓越側へ変化するようにしたがい、部材側面において交番載荷により交差するひびわれが少なくなってくる。よって、ねじりが支配的な範囲と曲げが支配的な範囲との破壊形式の境界を交番載荷実験の損傷状況から判断すると、斜めひびわれの角度が  $45^\circ$  以下で、さらに部材上面には交番載荷により交差するひびわれが発生するものの、部材側面では斜めひびわれが交差しないような状態と捉えることができ、図-4における中間型や中間型IIの損傷状況がそれに近い状態と言える。

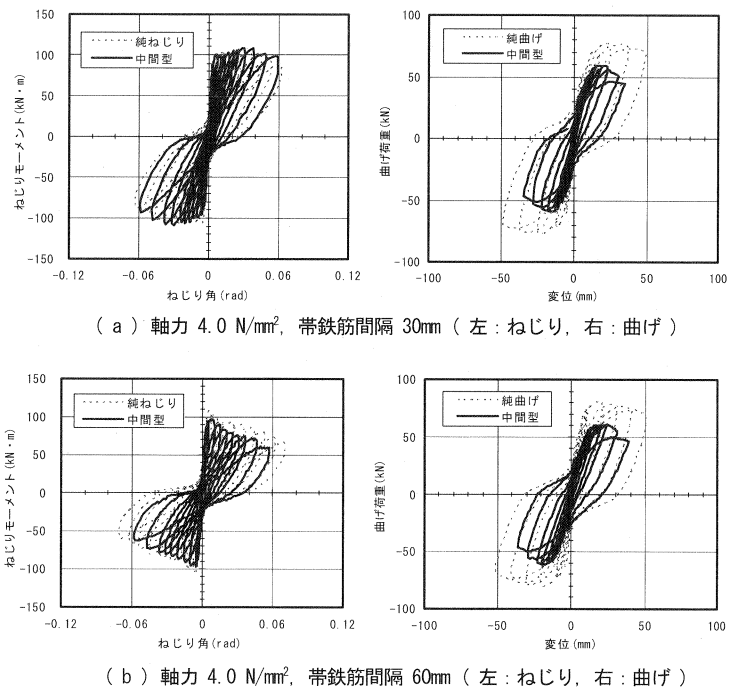


図-3 荷重-変位関係

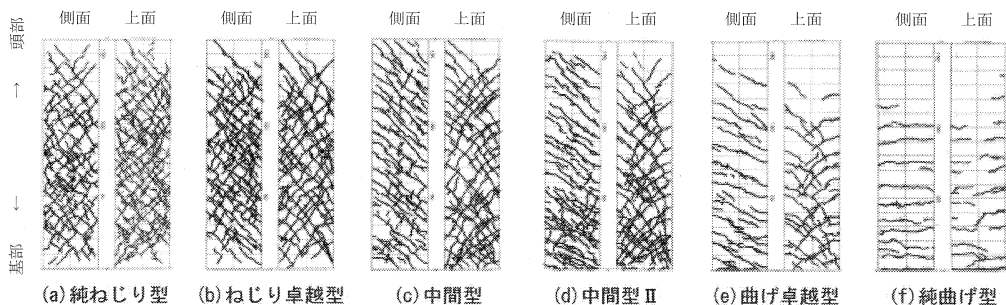


図-4 ひびわれ図 (最大荷重時: 軸力  $4.0\text{N/mm}^2$ 、帯鉄筋間隔  $30\text{mm}$ )

(3) 実験による相関曲線図

初期軸力および帯鉄筋間隔をパラメータにした実験値における最大耐力時の相関曲線を図-5に示す。なお、図には後述する主鉄筋ひずみや帯鉄筋降伏から判断した破壊モードの境界線を併記している。

(4) 主鉄筋ひずみによる境界状態

ねじり破壊と曲げ破壊の境界状態は、図-1に示すとおり最外縁鉄筋のひずみ  $\epsilon_s=0$  の時と考えることができる。ただし、図-1に示す状態は作用軸力が0でかつ、単調載荷状態を想定しているため、本実験のように交番載荷の場合には繰り返し載荷による残留ひずみを考慮する必要がある。したがって、主鉄筋が降伏した後の主鉄筋ひずみとねじり回転角の関係より、除荷後（回転角が0 rad）からの主鉄筋ひずみの増分が0に近くなるループを境界状態と判断することとした。境界状態と判断した主鉄筋ひずみとねじり回転角の関係の一例を図-6に示す。この図より、載荷にともないねじり角が増加しているにもかかわらず、ねじりによる引張応力（ひずみ）により、曲げによる圧縮応力（ひずみ）が打ち消され、主鉄筋のひずみの増分がほぼ0となっていることが分かる。この境界状態となるループでの荷重を図-5中に併記し（●印）、この点と原点を結ぶ直線（実線）を主鉄筋ひずみによる境界線とする。この結果から、境界は帯鉄筋間隔による影響が大きく、帯鉄筋が少ない場合（ctc 60mm）には境界が曲げ卓越側にシフトする、すなわちねじりが卓越する領域が大きくなる。

(5) 帯鉄筋降伏による境界状態

帯鉄筋降伏による判断の場合、帯鉄筋が降伏するときはねじりが支配的な範囲、降伏しないときは曲げが支配的な範囲と考え、中間型および中間型IIのケースにおいて帯鉄筋が降伏する点を境界状態と判断することとした。この境界状態となるループでの荷重を図-5中に併記し（▲印）、この点と原点を結ぶ直線（鎖線）を境界線とした。ただ

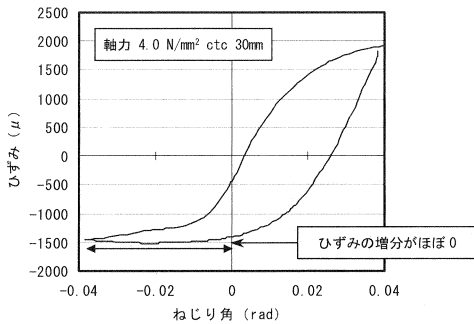


図-6 主鉄筋ひずみのループ

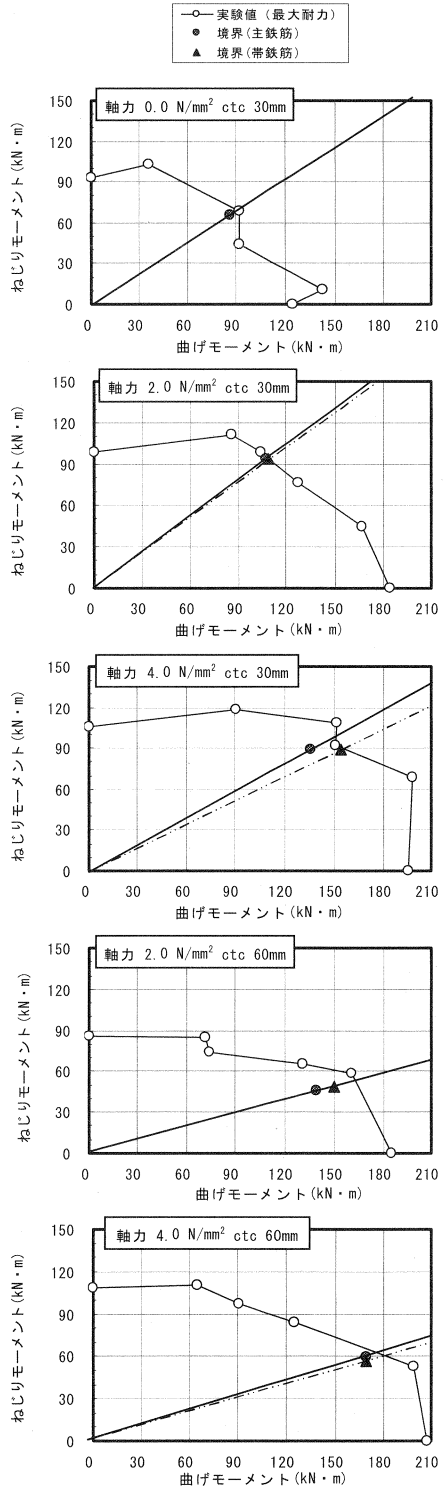


図-5 相関関係と境界線

し、軸力 0.0 N/mm<sup>2</sup> で、帯鉄筋間隔 30mm の中間型のケースでは、帯鉄筋降伏が見られなかった。

(6) 破壊形式の境界を考慮した相関曲線

ねじりと曲げの相関曲線は、主に式(1)で表される。ここで、純ねじり耐力については、斜め曲げ理論式<sup>3)</sup> および立体トラス類似理論<sup>2)</sup> に基づく算定式があり、それぞれ式(2) および式(3)により算出される。なお、両算定式とも、軸圧縮力による影響を考慮している。

・相関曲線

$$\frac{M_b}{M_{bu}} + \left(\frac{M_t}{M_{tu}}\right)^2 = 1 \quad \dots \text{式(1)}$$

- ここに、  $M_b$  : 曲げモーメント
- $M_{bu}$  : 曲げ耐力
- $M_t$  : ねじりモーメント
- $M_{tu}$  : ねじり耐力

・斜め曲げ圧縮破壊理論式<sup>3)</sup>

$$M_{tu} = \beta_n \cdot K_t \cdot f_{wck} \quad \dots \text{式(2)}$$

- ここに、  $\beta_n$  : 軸圧縮力による係数  
(  $\beta_n = \sqrt{(1 + \sigma_n / 1.5 f_{fk})}$  )
- $\sigma_n$  : 軸力による平均圧縮応力度
- $f_{fk}$  : コンクリート引張強度
- $f_{wck}$  : 斜め圧縮強度 (  $f_{wck} = 1.25 \sqrt{f_{ck}}$  )
- $f_{ck}$  : コンクリート圧縮強度
- $K_t$  : ねじり係数

・立体トラス類似理論式<sup>2)</sup>

$$M_{tu} = 2A_n \eta \sqrt{\frac{A_s \sigma_{sv} \cdot \sum A_{s1} \sigma_{s1}}{S P_0}} \cdot \beta_n \quad \dots \text{式(3)}$$

- ここに、  $A_n$  : ねじり有効断面積 (  $a - t_b$  )<sup>2</sup>
- $\eta$  : 係数 ( = 0.84 )
- $A_s, A_1$  : 帯鉄筋, 主鉄筋の断面積
- $a$  : 正方形断面1辺の長さ
- $\sigma_{sv}, \sigma_{s1}$  : 帯鉄筋, 主鉄筋の降伏応力
- $t_b$  : 圧縮応力の作用深さ (  $t_b = 0.8t$  )
- $S$  : 帯鉄筋間隔
- $t$  : 仮想壁厚
- $P_0$  : せん断流の通路の周長 (  $a - t_b$  ) × 4

これらの2つの算定式に基づく相関曲線を図-7に示す。なお、曲げ耐力については、コンクリート標準示方書に準じて算出した。

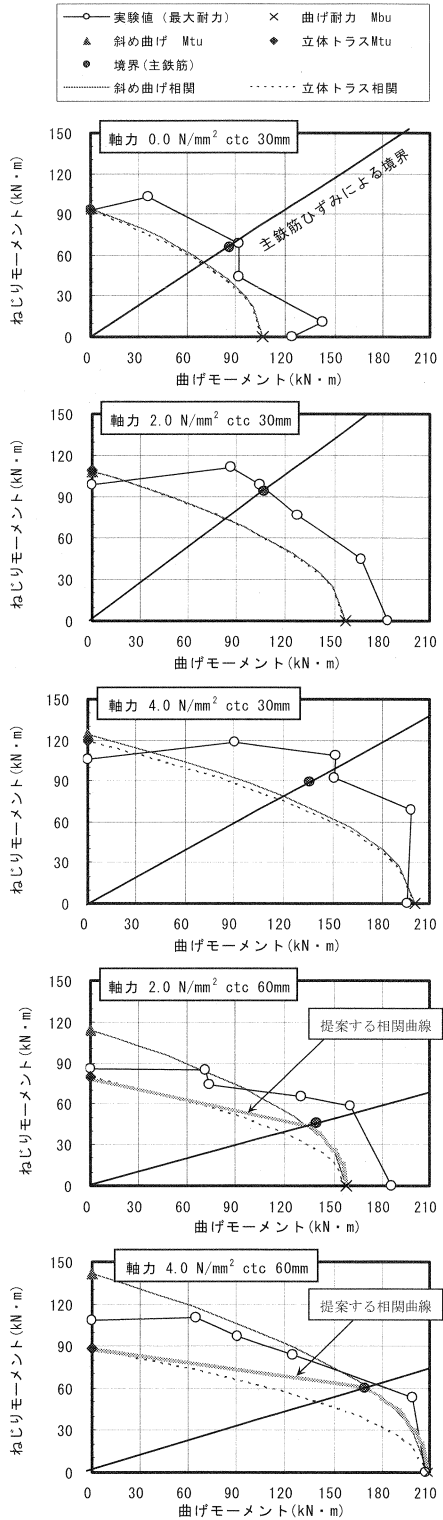


図-7 相関曲線

図より、帯鉄筋間隔が30mmの場合は、両理論式によるねじり耐力の差は小さく、相関曲線はほぼ同じ曲線となる。

一方、帯鉄筋間隔が60mmの場合は、両理論式によるねじり耐力の差が大きくなり、実験値との比較においては、斜め曲げ理論式によるねじり耐力が実験値を大きく上回る結果となった。これは、斜め曲げ理論式によるねじり耐力がコンクリートの圧縮強度に依存するのに対し、立体トラス類似理論式では鉄筋量がねじり耐力に影響を及ぼすため、帯鉄筋量の減少によるねじり耐力の低下が考慮されたためである。このことから、帯鉄筋量が小さい範囲では、立体トラス類似理論式による相関曲線を使用することが適当であると考えられる。ただし、曲げが卓越する領域では、斜め曲げ理論式による相関曲線も安全側の結果となっている。

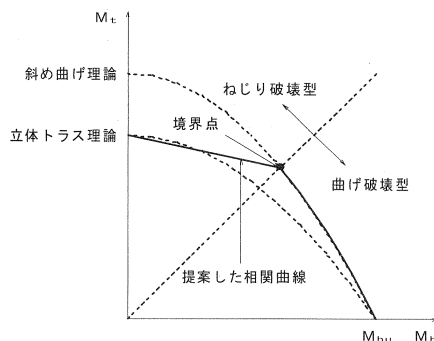


図-8 相関曲線の提案

以上を踏まえ、本研究で対象とした範囲の供試体について、ねじりと曲げの相関曲線として、以下の相関曲線を提案する。また、概念図を図-8に示し、これによる相関曲線を図-7に併記する。

- ① 純ねじり耐力は、立体トラス類似理論式を用いる。
- ② 斜め曲げによる相関曲線と境界線の交点と①のねじり耐力を直線で結ぶ。
- ③ 境界線から純曲げ耐力までは斜め曲げ理論による相関曲線を用いる。

図-7より、提案した相関曲線は実験値によるねじりと曲げの相関関係をより適切に評価できている。

### 5. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) ねじり破壊と曲げ破壊の境界点は、帯鉄筋間隔による影響が大きく、帯鉄筋量が少ない場合には、境界が曲げ側にシフトする。すなわち、ねじり破壊が卓越する範囲が大きくなる。
- (2) 帯鉄筋間隔が30mmの場合、本研究で対象とした供試体については、斜め曲げ理論式および立体トラス類似理論式によるねじり耐力はほぼ同じであり、相関曲線も同様であった。
- (3) 帯鉄筋間隔が60mmの場合、本研究で対象とした供試体については、斜め曲げ理論式によるねじり耐力は実験値に対し過大評価となり、立体トラス類似式によるねじり耐力の方が安全側の結果となった。
- (4) ねじり破壊と曲げ破壊の境界線および2つの理論式(斜め曲げ理論および立体トラス理論)を用いた相関曲線を組み合わせた新たな相関曲線を提案した。提案した相関曲線は、本実験で対象とした供試体について実験値によるねじりと曲げの相関関係をより適切に評価しており、この相関曲線を用いることでより合理的、経済的な設計となる可能性がある。

ただし、本研究で対象とした範囲外の鉄筋量等による理論式の適用については、さらなる検討が必要である。

### 参考文献

- 1) 泉：コンクリート部材の終局ねじり強度の算定と設計法に関する研究，土木学会論文報告集，第305号，pp.111-124，1981.1.
- 2) 泉：ねじりと曲げを受けるコンクリート部材の終局強度と設計法，土木学会論文報告集，第327号，pp.139-150，1982.11.
- 3) (社)土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，pp.81-92，2002.3.
- 4) 大塚・王・高田・吉村：純ねじりを受けるRC部材の履歴特性に影響を及ぼすパラメータに関する実験的研究，土木学会論文集，No.739/V-60，pp.93-104，2004.8.
- 5) 大塚・竹下・浦川：軸力、曲げ/せん断を及びねじりの複合荷重を同時に受けるRC部材の耐震性能と相関特性，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.123-139，2005.10.
- 6) 泉：組合せ力を受けるコンクリート部材の設計，技法堂出版，2004.10.