

軸力、曲げおよびねじりを同時にうける RC 部材の 非線形挙動に関する実験的研究

An experimental study on nonlinear behavior of RC members in combined axial force, bending and torsion

浦川洋介*, 大塚久哲**, 竹下永造***

Yousuke URAKAWA, Hisanori OTSUKA, Eizou TAKESHITA

*工修, オリエンタル建設株式会社, 福岡支店 技術部 (〒810-0001 福岡市中央区天神 4-2-31)

** 工博 九州大学大学院教授, 工学研究院 建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

*** 九州大学大学院, 工学府 建設システム工学科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

When cyclic loads like earthquakes acts, RC members are affected not only bending moments, shear and axial force but also torsional moments. However effects of torsion have not been considered strictly in seismic design. Then in order to clarify seismic performance of RC members subjected to combined loads, cyclic loading tests were conducted. For these results, we focused the relations between load and deformation, the reduction of rigidity and the equivalent damping ratio in combined loads, and these are compared for pure loading (pure bending, pure torsion).

Key Words: torsion, reduction of rigidity, equivalent damping ratio, combined loads, cyclic loading

キーワード: ねじり, 剛性低下, 等価減衰定数, 複合荷重, 交番載荷

1. はじめに

実際のコンクリート構造物が地震力のような交番荷重を受けた場合, 部材には曲げモーメントのみならず, 軸力, せん断, ねじりなどの複合荷重が作用する. 特に, 橋軸直角方向に偏心した逆L字型のRC橋脚や, RCアーチ橋, 曲線橋, 不等橋脚を有するPC連続ラーメン橋などでは, 曲げモーメントのみならずねじりモーメントの影響が無視できない場合があるため, 複合荷重状態における部材の挙動を適切に評価する必要がある.

以下に, コンクリート構造物のねじりに関する既往の研究の概要を述べる.

コンクリート部材のねじり問題については, 弾性理論や塑性理論などの古典ねじり理論や, 終局強度算定における斜め曲げ理論や立体トラス理論が代表的である.

泉¹⁾は, ねじりを受ける長方形のRC部材の終局強度とその挙動を立体トラス類似の考え方を採用し, 理論的検討を行うとともに, RC, SRC, PC部材に単一方向ねじり載荷を行った自らの実験結果との比較を行っている. その結果, 終局強度については精度良く表現できることを確認し, これをもとにねじりを受ける部材の設計法を提案している. さらに, その後の研究²⁾では, ねじりと曲げの組

合せ荷重が作用するRC部材の終局挙動について, ねじりが支配的になる場合と曲げが支配的になる場合の荷重比率の算定式を誘導し, それぞれに対する適用理論(立体トラス理論, 斜め曲げ)を示している.

長瀬ら³⁾は, 交番ねじりモーメントを受けるRC部材について実験を行い, 交番載荷時には一方向荷重載荷時に比べ終局耐力が低下することなどの知見を得ている. また, その力学挙動を解析により定量的に評価している.

佐伯ら⁴⁾は, ねじりと純曲げの組合せ荷重を受けるRC部材の破壊パターンについて, コンクリート, 軸方向鉄筋, 横方向鉄筋の破壊の3パターンがあることを実験により確認し, 曲げとねじりの破壊相関曲線を示している.

2. 本研究の概要

これまでの研究では, 曲げとねじりの相関関係について, 主に終局耐力について述べているものが多いが, 従来の許容応力度設計法から限界状態設計法への移行を考える上では, 部材の終局耐力のみならず, ひびわれや部材降伏などの各限界状態における構造物の耐力及び変形性状を評価する必要がある.

また, 耐震設計において時刻歴非線形動的解析を行う場

合に必要な復元力特性のモデル化についても、曲げに対しては、多数の復元力特性が提案されているが、ねじりを受けるRC部材の非線形履歴特性については、これまでの知見が少なく、斜めひび割れの発生による剛性低下を考慮した等価剛性を用いる程度にとどまっている。履歴減衰の観点から見ても、曲げでの損傷による減衰は非線形履歴により自動的に解析に取り込まれるが、ねじり挙動については考慮されていない。さらに、曲げとねじりの複合荷重を受ける場合に、それぞれの骨格曲線を含めた復元力特性に及ぼす影響についての考察は十分ではない。

ねじりによる非線形挙動を適切に評価することや曲げとねじりの複合荷重が作用する場合の相互作用を考慮することでさらに合理的な検討ができるものと考えられる。

これらのことを踏まえ、著者らは、曲げとねじりを受けるRC部材の耐震性能を把握するため、RC橋脚を想定した模型供試体を制作し、交番載荷実験を行ってきた⁵⁾。本稿では、これらの実験により得られた結果から特に、荷重-変形関係、剛性低下率および等価減衰定数に着目し考察を行った。

3. 実験概要

3.1 実験供試体

供試体は、柱部分の断面が400mm×400mmの充実矩形断面であり、部材長さは1600mmである。載荷位置での局部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鋼棒にて定着している。実験供試体の外形寸法を図-1に示す。

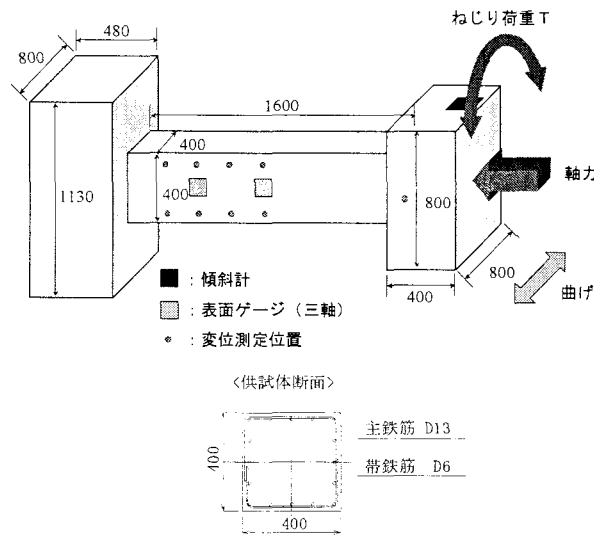


図-1 供試体寸法

3.2 検討ケース

本稿においては、①軸力、②帯鉄筋間隔 (ctc)、③曲げとねじりの載荷比率をパラメータとして行った25体の供試体のうち、表-1に示す15体の供試体について報告する。このうちケース番号 No.11,12,14,15, No.21~25 の9体については、文献5)にその実験結果を掲載済みである。軸力は、設計基準強度の0%~10%である0.0~4.0 N/mm²

とした。帯鉄筋間隔は、30mmと60mmの2ケースとし、帯鉄筋比はそれぞれ1.16%および0.58%である。また、曲げとねじりの載荷比率は、相関曲線において曲げが卓越するケース、ねじりが卓越するケースおよび曲げとねじりの中間程度の荷重比率となるように目標載荷比率を定めた。目標載荷比率 $\Delta M_t / \Delta M_b$ (M_t : ねじりモーメント, M_b : 曲げモーメント) は、同時載荷時における M_t と M_b の増加比率である。表-1 中 () 内の角度は、相関曲線での曲げおよびねじり軸に関する載荷比率の角度であり、 $\tan^{-1}(\Delta M_t / \Delta M_b)$ の式により求めた。本研究では、ねじり荷重の増分を曲げ荷重の増分に対して大きくとったケースをねじり卓越型、その逆を曲げ卓越型、さらに載荷比率が1.0のケースを中間型と呼ぶこととする。また、純曲げ、純ねじり (以下、両者を純荷重と呼ぶ) についても実験を行った。

使用材料は、コンクリートの設計基準強度が $\sigma_{dk}=40$ N/mm²、鉄筋は軸方向鉄筋をD13、帯鉄筋をD6とし、それぞれSD295を使用した。表-2および表-3に使用材料の強度試験結果を示す。

表-1 検討ケース

ケース No.	軸力 (N/mm ²)	帯鉄筋間隔 etc (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			0.58 (30°)	曲げ卓越型
5			- (0°)	純曲げ
11	- (90°)		純ねじり	
12	4.0		1.73 (60°)	ねじり卓越型
13			1.00 (45°)	中間型
14			0.58 (30°)	曲げ卓越型
15			- (0°)	純曲げ
21		- (90°)	純ねじり	
22	4.0	60	1.73 (60°)	ねじり卓越型
23			1.00 (45°)	中間型
24			0.58 (30°)	曲げ卓越型
25			- (0°)	純曲げ

表-2 コンクリート材料試験結果

ケース No.	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
1	6	33.4	3.9	2.28×10^4
2	28	47.6	4.3	3.11×10^4
3	35	51.1	4.0	3.04×10^4
4	31	43.2	3.6	3.61×10^4
5	7	32.8	2.8	2.14×10^4
11	11	35.3	4.1	2.39×10^4
12	32	49.3	3.4	3.01×10^4
13	33	50.4	4.0	3.55×10^4
14	49	47.5	3.7	3.16×10^4
15	6	40.6	2.9	2.46×10^4
21	15	45.7	4.2	2.73×10^4
22	38	60.4	4.8	3.66×10^4
23	27	35.2	3.4	3.00×10^4
24	37	51.6	3.8	3.10×10^4
25	6	41.1	3.3	2.62×10^4

表-3 鉄筋材料試験結果

鉄筋径	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y ($\times 10^{-4}$)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D6	322	1823	497	1.77×10^5
D13	340	1885	489	1.80×10^5

3.3 載荷方法⁹⁾

実験に使用した載荷装置を図-2に示す。

軸力は、軸力用ジャッキ①(図-2中の番号を示す。以下同様)から頭部架台用軸受け⑥と頭部固定用架台④を介して載荷する。頭部架台用軸受けはシャフトケースの中で軸方向にスライドできるため、供試体の軸方向長さが変化しても一定軸力を常に作用させておくことができる。さらに、曲げ荷重により供試体頭部が動いた場合にも、軸力ジャッキスライド装置⑫と頭部架台用軸受けによって、供試体頭部に垂直に軸力をかけることが可能となっている。

ねじり荷重の載荷は、供試体を設置した頭部固定用架台に、ポンプからの油圧を2本のねじり載荷用ジャッキ③に等しく伝達させることで、ねじり荷重を発生させる。その際、頭部架台用軸受けがスムーズに回転することにより滑らかに交番載荷を行うことができる。

曲げ荷重載荷は、ねじり荷重用ジャッキと頭部架台用軸受け、頭部固定用架台などを載せたねじり荷重載荷用フレーム⑤を押すことによって行い、ねじり荷重とは独立して曲げ荷重交番載荷を行うことができる。その際、頭部架台用軸受けがピンになっているため、頭部固定用架台は供試体頭部に対し同じ向きを取りつづけることができる。

図-3(a)、(b)に各ジャッキ位置関係、図-3(c)に載荷状況を示す。

載荷は、降伏までは目標載荷比率を一定に保つことを目標に、曲げとねじりの変形量を各載荷ステップで調整して行った。降伏以降は、降伏時の変位量の倍数で交番載荷を行った。図-4に載荷パターンの一例として、ねじり卓越型のケースを示す。

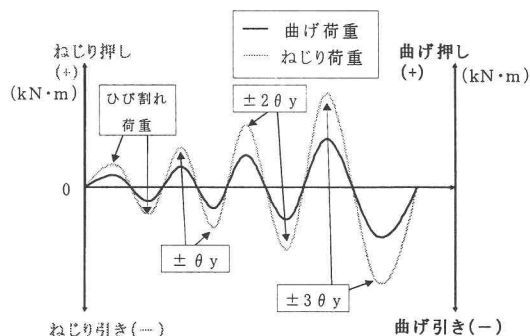


図-4 載荷パターンの一例(ねじり卓越型)

3.4 測定項目⁹⁾

主な測定項目は、荷重(曲げ、ねじり)、変位、ねじり角、主鉄筋ひずみ、帯鉄筋ひずみである。

鉛直荷重は、供試体に作用する荷重を、鉛直方向ジャッキに取り付けた鉛直方向ロードセルにより測定した。また、

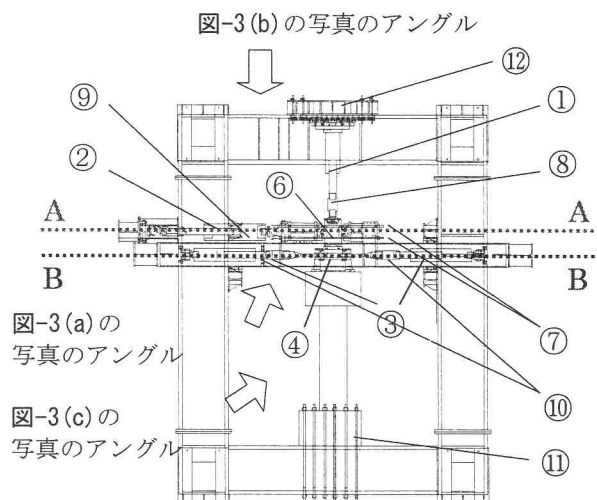
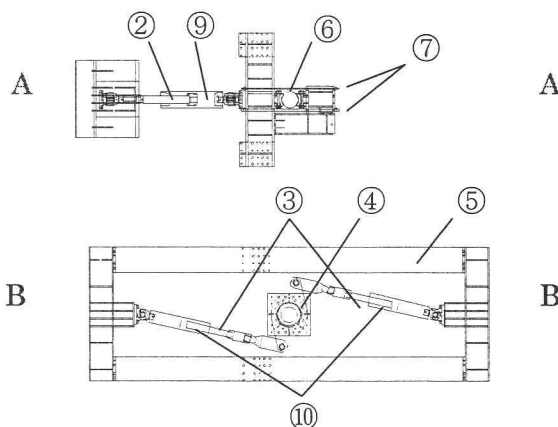


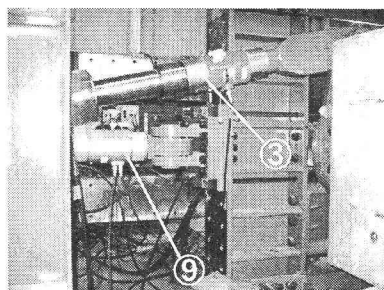
図-3(a)の
写真の角度

図-3(c)の
写真の角度

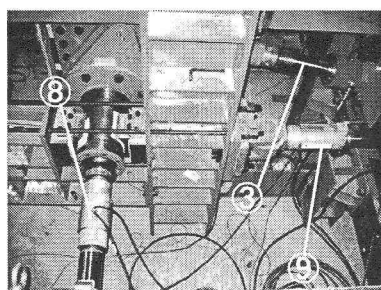


①	軸力用ジャッキ	⑦	P C 鋼棒
②	曲げ荷重用ジャッキ	⑧	軸力用ロードセル
③	ねじり荷重用ジャッキ	⑨	曲げ荷重用ロードセル
④	頭部固定用架台	⑩	ねじり荷重用ロードセル
⑤	ねじり荷重載荷用フレーム	⑪	基部固定用 P C 鋼棒
⑥	頭部架台軸受け	⑫	軸力ジャッキスライド装置

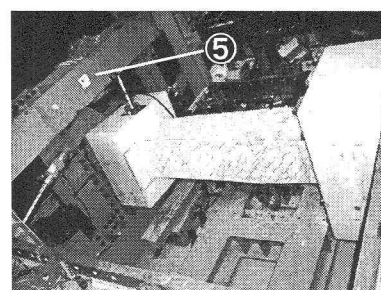
図-2 載荷装置



(a)



(b)



(c)

図-3 載荷状況

鉛直方向ロードセルにより荷重が一定に作用していることも確認した。

曲げ荷重は、供試体に作用する荷重を、曲げ荷重ジャッキに取り付けた曲げ荷重用ロードセルにより測定した。

ねじり荷重は、2本のねじり載荷用ジャッキに設置したロードセルの値をそれぞれ P_E 、 P_W とし、頭部治具の回転中心とジャッキ先端部の載荷ピンの中心を結んだ直線（長さ l ）とジャッキの軸線に、回転中心から下した垂線とのなす角度 θ とし、式(1)よりねじりモーメント M_t を算出した。図-5 にねじり荷重載荷方法を示す。

$$M_t = (P_E + P_W) \times l \times \cos \theta \quad \cdots \text{式(1)}$$

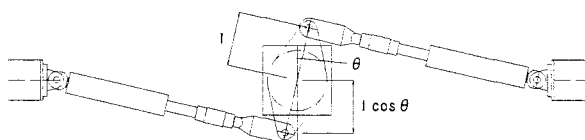


図-5 ねじり荷重載荷方法

また、変位計、傾斜計および鉄筋ゲージ位置を図-6 に示す。変位計は上下2段に設置しており、その変位計より、ねじり角を算出した。さらに、頭部フーチングに設けた変位計9番の値を曲げ変位として使用した。

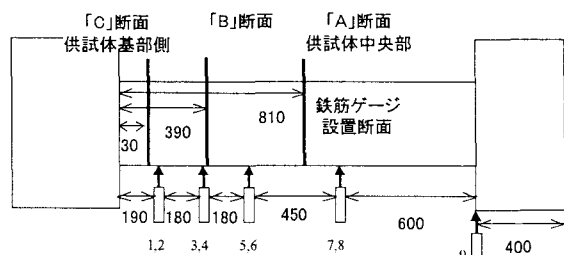


図-6 変位計および鉄筋ゲージ位置

4. 実験結果

4.1 荷重-変形関係

図-7～図-9 に実験で得られた曲げおよびねじりに関する荷重と変形の関係を示す。ねじりについては「ねじりモーメント-ねじり角関係」を、曲げについては「曲げ荷重-曲げ変位関係」のグラフを示している。グラフは、上段がねじり、下段が曲げの結果であり、左からねじり卓越型、中間型、曲げ卓越型を示している。ここで、グラフ中の破線は、純ねじりおよび純曲げにおける荷重-変位関係であり、複合荷重時との比較のために併記した。

検討対象は、表-1 に示すケースのうち、(1) 軸力 0.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 30 mm、(2) 軸力 4.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 30 mm、(3) 軸力 4.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 60 mm とし、(1)と(2)では軸力による影響を、(2)と(3)では帯鉄筋間隔の影響を考察することとした。なお、各供試体の圧縮強度が異なるため、最大耐力の直接的な比較には留意が必要である。

(1) 軸力 0.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 30 mm

軸力 0.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 30 mm（ケース No.1～No.5）の結果を、図-7 に示す。

ねじりモーメント-ねじり角関係では、除荷時の残留ねじり角は軸力がある場合（図-8,9）に比べると大きい。除荷から載荷に移るモーメント 0 付近で、残留が急激に小さくなっている。これは、交番載荷により正負両側の損傷が進むことで、除荷から載荷に移る時の抵抗力が小さいためであり、軸力がない場合に顕著である。また、ねじり卓越型では、純ねじりと同様の履歴曲線を描くが、中間型、曲げ卓越型とねじりの載荷比率が低くなるにしたがい、ねじり耐力が純ねじりに対して著しく低下しており、ループもほとんど描いていない。

曲げの荷重-変位関係では、RC部材の典型である紡錘型の履歴を示す。ねじり卓越型では、卓越しない曲げ側の耐力が大きく低下しているが、中間型および曲げ卓越型では、純曲げの時と同様のループとなっている。

(2) 軸力 4.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 30 mm

軸力 4.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 30 mm（ケース No.11～15）の結果を、図-8 に示す。

ねじり卓越型のねじり挙動は純ねじりと、曲げ卓越型の曲げ挙動は純曲げとそれぞれ同様の履歴を示している。逆に卓越しない側では、それぞれ純荷重時に対し、耐力が著しく低下しているものの、軸力 0.0 N/mm² のケースに比べると大きなループを描いており、エネルギー吸収が見られる。一方、中間型の荷重-変形関係では、軸力 0.0 N/mm² のケースでは複合荷重作用時の曲げの挙動が純曲げに近く、ねじりの挙動は純ねじりに比較して低い耐力であったが、軸力 4.0 N/mm² のケースでは逆に複合荷重作用時のねじりが純ねじりと同様で、曲げ側で耐力の低下が見られた。

また、軸力 0.0 N/mm² のケースに比べ、軸力 4.0 N/mm² のケースでは、軸力の影響によりねじりひびわれが抑制されることにより、ねじり耐力が増加している。曲げの挙動では、軸力 0.0 N/mm² のケースに比べ、除荷時に若干原点を指向する傾向があるが、これは軸力の作用により除荷時にひびわれが小さくなり、残留変形が小さくなることを示している。

(3) 軸力 4.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 60 mm

軸力 4.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 60 mm（ケース No.21～25）の結果を、図-9 に示す。

帯鉄筋間隔が 60 mm となり、帯鉄筋比が小さくなると、ねじり側の挙動において、最大耐力後すぐに荷重が低下し始め、負勾配の骨格曲線を示す。これより、本研究で対象とした供試体においては、帯鉄筋間隔が曲げおよびねじりの最大耐力に与える影響は小さいが、ねじり挙動のじん性に対しては帯鉄筋が大きな影響を及ぼしていることが分かる。また、各載荷比率での複合荷重作用時の骨格曲線は、純ねじり、純曲げの骨格曲線と相似形であり、帯鉄筋間隔 30 mm（軸力 4.0 N/mm²）のケースと同様の傾向である。

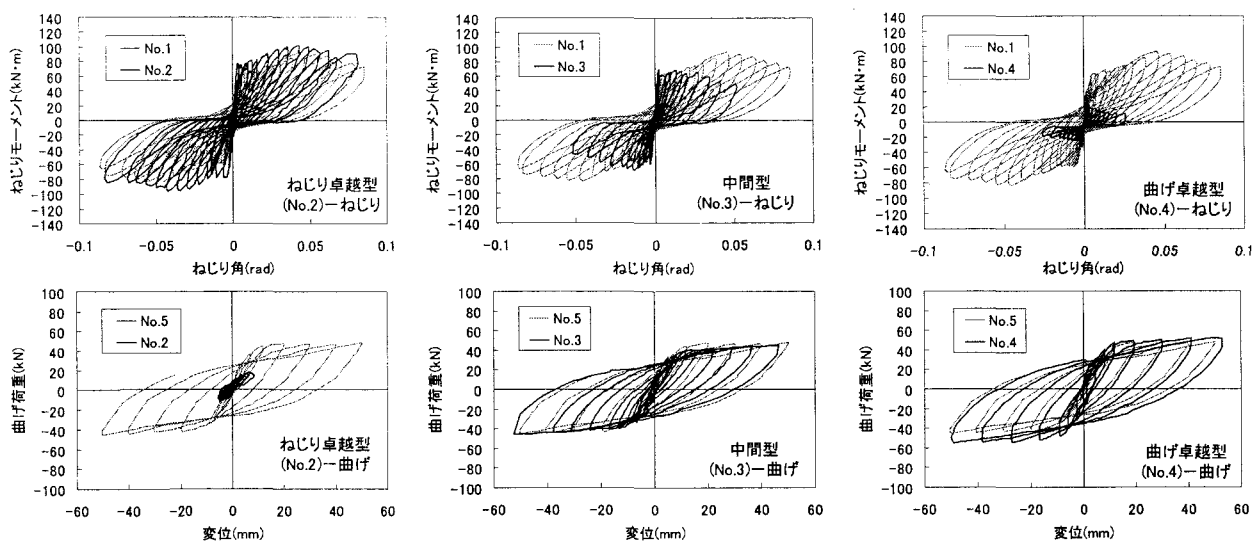


図-7 荷重—変形関係 (軸力 0.0N/mm², 帯鉄筋間隔 30mm/上段:ねじり, 下段:曲げ)

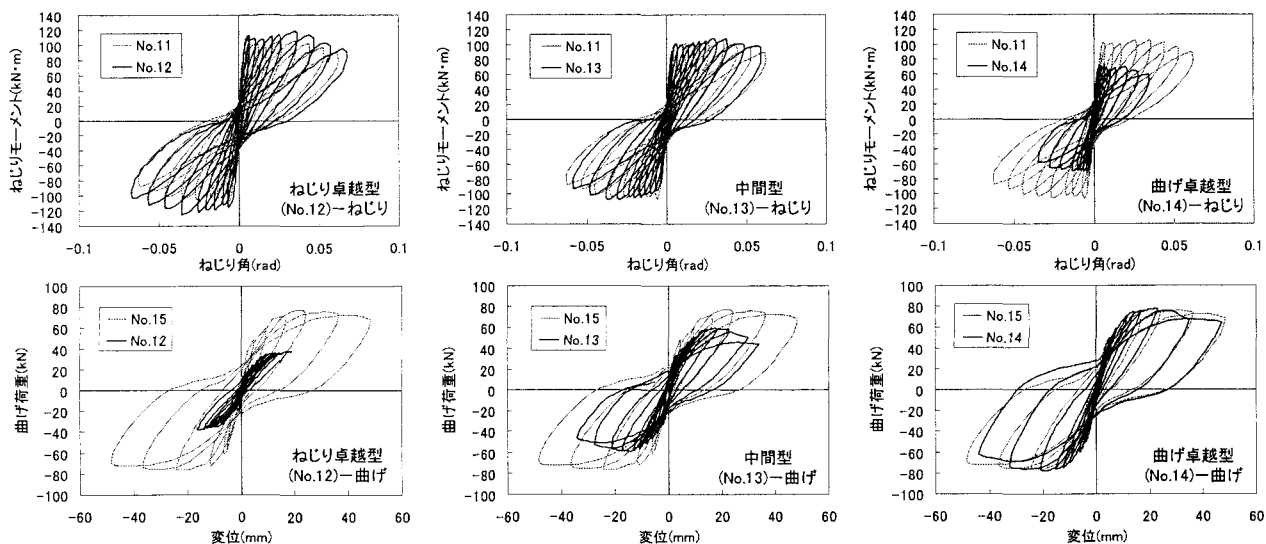


図-8 荷重—変形関係 (軸力 4.0N/mm², 帯鉄筋間隔 30mm/上段:ねじり, 下段:曲げ)

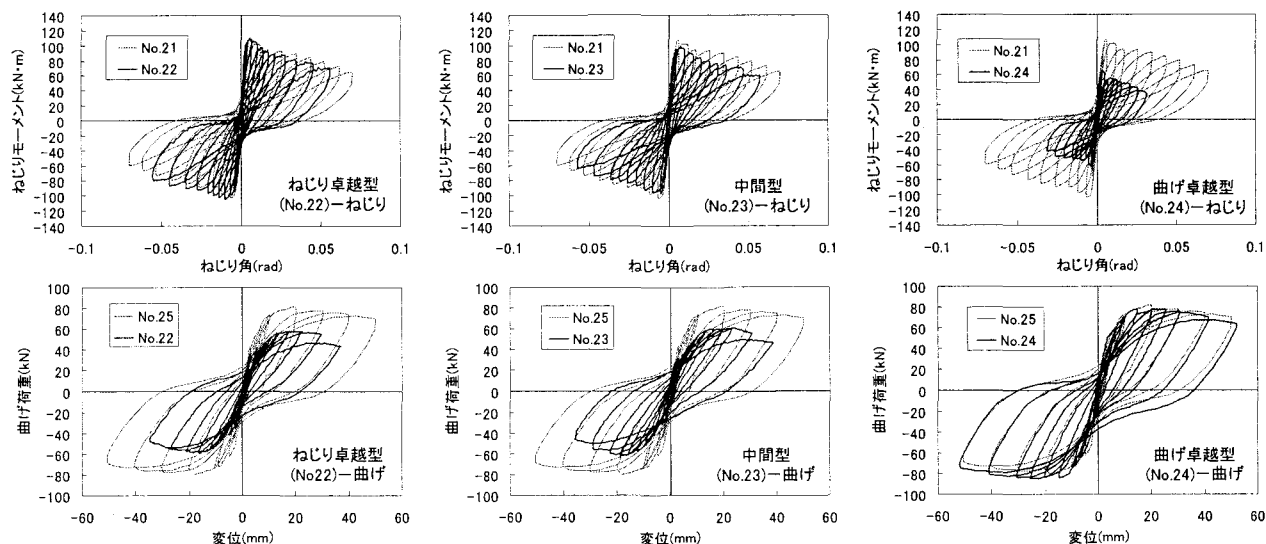


図-9 荷重—変形関係 (軸力 4.0N/mm², 帯鉄筋間隔 60mm/上段:ねじり, 下段:曲げ)

4.2 剛性低下率

図-10～図-11 に実験で得られたねじりおよび曲げに関する基準塑性率と剛性低下率の関係を示す。ここで、 GK/GK_0 および EI/EI_0 は、ねじりおよび曲げそれぞれの初期剛性（実験値）に対する、履歴ループ毎の等価剛性の比であり、剛性低下率を表している。また、 θ/θ_y （純ねじり）、 δ/δ_y （純曲げ）は、複合荷重作用時におけるねじりおよび曲げによる変形量を、それぞれ純ねじりおよび純曲げにおける降伏時の変形量で除して基準化した値である（以下、基準塑性率）。ここで、基準塑性率を用いた理由としては、複合荷重作用時の各イベントを理論的に評価することが現時点では難しいと考えられることから、純荷重時の力学特性との比較により、複合荷重時の挙動を定量的に評価するためである。

(1) 純荷重時における比較

図-10 は、純ねじり、純曲げの剛性低下率について、軸力および帯鉄筋間隔の影響を比較したものである。

ねじりに与えるひび割れの影響は大きく、ひび割れが進展すると、ねじり剛性は急激に低下する。既往文献(6)によれば、ひび割れが入っている場合のねじり剛性は、ひび割れが入っていない場合のひび割れ剛性の 1/20 程度といわれる。耐震設計では、L2地震動が作用した場合には斜めひび割れが発生し、部材はねじりに対して塑性状態に入っていると判断できることから、ねじり剛性は一般に全断面有効剛性の 1/10～1/20 の等価剛性が用いられる⁷⁾。

ここで、ねじりの等価剛性 1/10 に着目すると、帯鉄筋間隔 30 mm（軸力 0.0 N/mm²、軸力 4.0 N/mm²）のケースでは、どちらもねじり塑性率 12 程度で等価剛性 1/10 程度まで剛性が低下しているが、軸力 4.0 N/mm²の方が、軸力 0.0 N/mm²に比べ、剛性低下が緩やかであることが分かる。また、帯鉄筋間隔 60 mm（軸力 4.0 N/mm²）の

ケースでは、帯鉄筋間隔 30 mm（軸力 4.0 N/mm²）のケースに対し、純ねじりの剛性低下率が大きく（より小さなねじり角で剛性が低下している）、ねじり基準塑性率 8 程度で、等価剛性が 1/10 となっており、帯鉄筋間隔が大きく、帯鉄筋比が小さい場合、ねじり剛性が急激に低下することが分かった。

純曲げでは、軸力 0.0 N/mm²（帯鉄筋間隔 30 mm）のケースでは、軸力 4.0 N/mm²（帯鉄筋間隔 30 mm）のケースに比べ、剛性低下が若干早く進展している。また、帯鉄筋間隔による曲げの等価剛性への影響はほとんど見られず、本実験で対象とした供試体については、帯鉄筋が曲げの等価剛性へ及ぼす影響は小さいと判断される。

(2) 複合荷重時における比較

次に複合荷重時における各ケースの等価剛性の比較を行った。

図-11(a)～図-11(c)は、各ケースにおける複合荷重時のねじりおよび曲げに関する基準塑性率と剛性低下率の関係である。

ねじりに関して、軸力 0.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 30 mm のケースでは、純ねじり時に等価剛性が 1/10 程度まで低下する塑性率が 12 程度であったのに対し、ねじり卓越型では、ねじり基準塑性率 6 程度、中間型では 5 程度、さらに、曲げ卓越型になると 1 程度であり、純ねじりに対してかなり小さなねじり角で剛性が低下している。また、

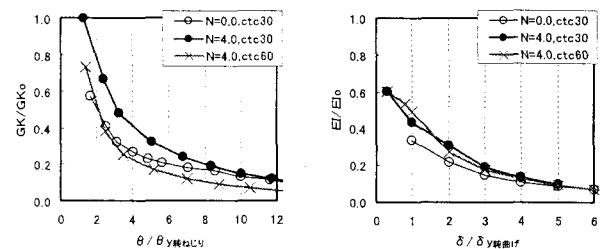
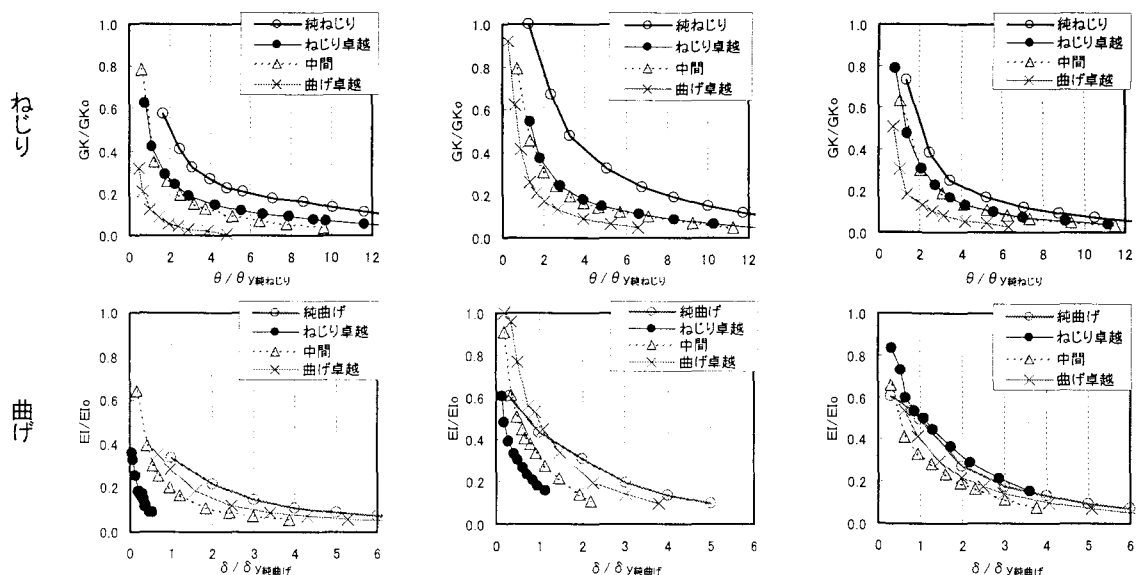


図-10 剛性低下率（純荷重時）



(a) 軸力 0.0 N/mm², ctc 30 mm

(b) 軸力 4.0 N/mm², ctc 30 mm

(c) 軸力 4.0 N/mm², ctc 60 mm

図-11 剛性低下率（複合荷重時）

剛性低下の傾向については、純ねじりのケースと相似形である。これらの傾向は、いずれのケースでも同様であり、ねじり卓越型および中間型ではほぼ同様の値であり、純ねじりに比べて、同じ変形における等価剛性は概ね 1/2 程度となっている。曲げ卓越型については、軸力 4.0 N/mm² (帯鉄筋間隔 30mm, 60mm) のケースでは、軸力 0.0 N/mm² (帯鉄筋間隔 30 mm) のケースほど剛性は低下していない。

また、純ねじりでの比較においては、帯鉄筋間隔の影響による剛性低下率の違いが見られたが、複合荷重時の等価剛性は帯鉄筋間隔によらずほぼ同程度であったため、帯鉄筋間隔 60mm のケースでは、純ねじりと複合荷重時での剛性低下率の差は小さくなっている。

一方、複合荷重時の曲げの剛性低下についても、曲げ卓越型では純曲げとほぼ同様の傾向を示すが、中間型、ねじり卓越型では剛性低下が早く起っている。ただし、軸力 4.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 60mm のケースでは、ねじり卓越型においても、その他のケースのような極端な履歴曲線の違いも見られず、純曲げと同様の剛性低下率となった。

4.3 等価減衰定数

図-12～図-13 に実験で得られたねじりおよび曲げに関する基準塑性率と等価減衰定数の関係を示す。横軸は、「4.2 剛性低下率」と同様に基準塑性率である。なお、等価減衰定数は、道路示方書 V 耐震設計編⁸⁾の式(9.3.4)より算出した。

(1) 純荷重時における比較

図-12 は、純ねじり、純曲げの等価減衰定数について、軸力および帯鉄筋間隔の影響を比較したものである。

純ねじりの場合の等価減衰定数は、10～20%であり、変形が進んでもその値はほぼ横ばい(一定)である。データに若干ばらつきはあるものの、軸力による影響は小

さいと考えられるが、帯鉄筋間隔の違いによる比較では、帯鉄筋間隔が大きいケース(60mm)の方が、ねじりの等価減衰定数も全体的に大きくなっている。これは、帯鉄筋比が小さい方が、ねじりによる損傷が大きく、履歴による減衰が大きくなるためである。

一方、純曲げの場合には、塑性率の増加にともない等価減衰定数も比例して増加しており、ねじりと曲げでその傾向が大きく異なる。軸力および帯鉄筋間隔の違いによる等価減衰定数の顕著な違いは見られず、ほぼ同様の値を示している。

(2) 複合荷重時における比較

図-13(a)～図-13(c)は、各ケースにおける複合荷重時のねじりおよび曲げに関する基準塑性率と等価減衰定数の関係である。

複合荷重時におけるねじりの等価減衰定数は、いずれのケースにおいても、ねじり卓越型および中間型ではほぼ同様の結果を示しており、純ねじり時と同程度かそれより 5%程度小さい 10%～15%程度であるが、塑性率が大きくなっても一定の値である傾向は、純ねじりと同様である。しかし、曲げ卓越型では、損傷が進むにつれ、ねじりの等価減衰定数も増加し、純ねじりより大きな値となっている。

複合荷重作用時における曲げの等価減衰定数は、同じケースでは载荷比率によらずほぼ同様の値を示している。

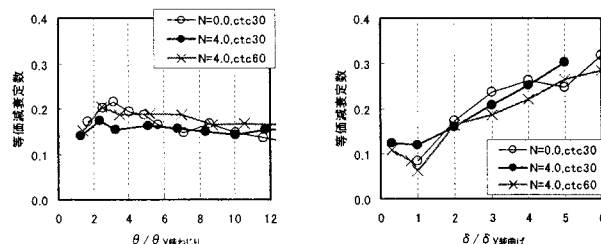
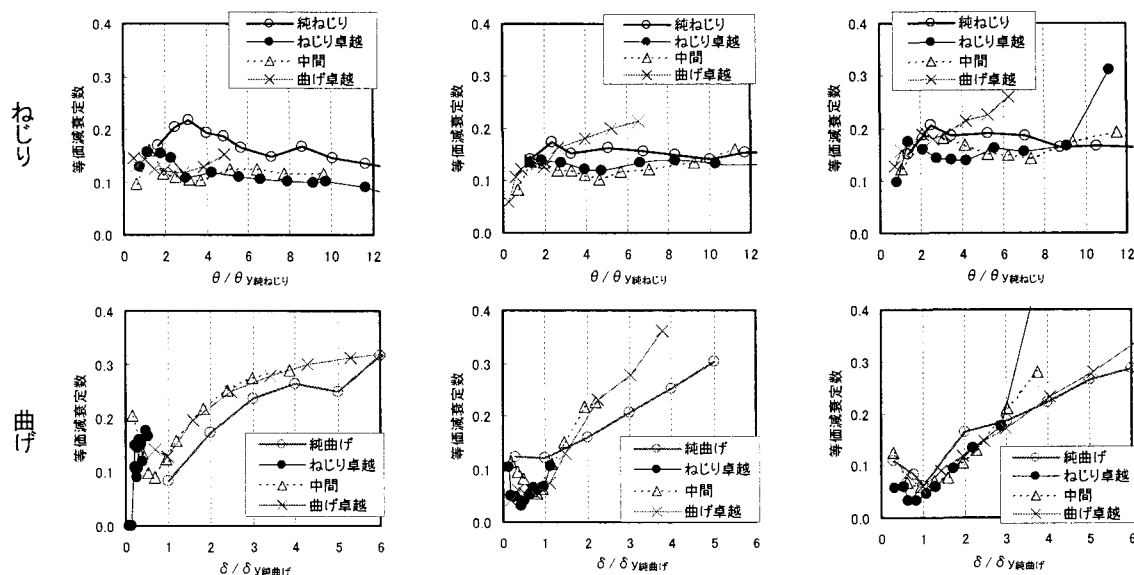


図-12 等価減衰定数 (純荷重時)



(a) 軸力 0.0 N/mm², ctc 30 mm

(b) 軸力 4.0 N/mm², ctc 30 mm

(c) 軸力 4.0 N/mm², ctc 60 mm

図-13 等価減衰定数 (複合荷重時)

ねじり側では、複合荷重時の方が純ねじり時より小さい等価減衰定数を示しているのに対し、曲げ側では、純曲げの場合に比べ複合荷重時の方が同程度か若干大きい傾向にある。これは、剛性低下の傾向と同様であり、複合荷重時には、純曲げの場合に比べ小さい変形で、剛性が低下し、損傷によるエネルギー吸収が大きくなり、等価減衰定数が大きくなっていることを示している。また、軸力 4.0 N/mm²、帯鉄筋間隔 30mm のケースにおける曲げ卓越型の結果は、荷重－変位関係や基準塑性率－等価剛性の関係を見ても分かるように、純曲げに比べてかなり早い段階（小さな変形）で剛性が低下しているため、等価減衰定数においても同様に、小さな変形で大きな値となっている。

軸力による影響としては、軸力 4.0 N/mm² のケースにおける複合荷重時の曲げの等価減衰定数は、増加の割合が純曲げに比べ急である。帯鉄筋間隔 60mm のケースは、帯鉄筋間隔 30mm のケースに比べ、複合荷重時における等価減衰定数の増加の割合が小さく、純曲げと同様の結果を示した。これは、複合荷重時では、帯鉄筋比が小さい場合、等価減衰定数に及ぼす影響は曲げに比べねじりの方が大きくなることから、ねじりの等価減衰定数は帯鉄筋間隔 60mm の方が大きくなり、逆に曲げの等価減衰定数は小さくなっているものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、RC橋脚をモデルとした模型供試体に対して、これまで行ってきたねじりおよび曲げの正負交番荷重実験結果の一部を用いて、複合荷重を受けるRC部材の挙動に関して、(1)荷重－変形関係、(2)剛性低下率および(3)等価減衰定数に着目し、考察を行った。

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

(1) 荷重－変形関係

- ・複合荷重時における荷重－変形関係は、ねじり卓越型でのねじり挙動および曲げ卓越型での曲げ挙動ではそれぞれ純ねじりおよび純曲げの荷重－変形関係とほぼ同様の結果を示す。
- ・卓越しない側では純曲げおよび純ねじりに比べ耐力や剛性が低下する結果を示した。
- ・中間型では、軸力 0.0 N/mm² のケースでは、曲げの履歴曲線が、軸力 4.0 N/mm² のケースでは、ねじりの履歴曲線が、それぞれ純荷重時の履歴曲線と同様の形状を示した。

(2) 剛性低下率

- ・純ねじりでは、軸力が小さいほど、また帯鉄筋比が小さいほど、ねじり剛性の低下が顕著である。
- ・純曲げでは、軸力 0.0 N/mm² のケースでは、若干小さな等価剛性となっているものの、帯鉄筋間隔の違いによる影響は見られなかった。
- ・複合荷重時のねじり側では、純荷重時に比べ、早い段

階で剛性が低下しているが、その傾向は相似形である。

(3) 等価減衰定数

- ・ねじりの等価減衰定数は、10～20%程度であり、変形が大きくなってもほぼ一定の値であるが、帯鉄筋比が小さい方が、減衰定数は若干大きい傾向である。
- ・曲げの等価減衰定数は、変形が大きくなるにつれ比例して大きくなっており、ねじりとは異なる傾向を示す。
- ・複合荷重作用時の等価減衰定数は、純荷重作用時に比べ、ねじりでは同程度か小さく、曲げでは同程度か大きい値を示した。

これらの結果は、複合荷重時においては、荷重比率により荷重－変形関係が大きく異なり、場合によっては、耐力を過大評価し得る可能性を示している。また、複合荷重時には、曲げだけでなく、ねじりでの履歴減衰も生じることから、これらを考慮することで、応答を低減できることも考えられる。

今後は、本研究で着目した結果をもとに、耐力については、各限界状態における相関曲線を提案し、剛性低下率および等価減衰定数を考慮することで複合荷重時のねじり挙動および曲げ挙動を定量的に評価し、複合荷重が作用するような構造物の動的解析を行う際の合理的なモデル化を提案していく予定である。

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) 長瀧，岡本，梅木，李：交番ねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の力学性状に関する研究，土木学会論文集，第 402，V-10，pp.135-144，1989.2.
- 4) 佐伯，高田，志村，藤田：ねじりと純曲げの組合せ荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の耐力，土木学会論文集，No.442，V-16，pp.35-42，1992.2.
- 5) 大塚，竹下，王，矢葺，角本，吉村：軸力，曲げ及びねじりの複合荷重を受けるRC部材の履歴復元力に関する実験的考察，土木学会地震工学論文集，No.067，2003.10.
- 6) Priestly et al.：橋梁の耐震設計と耐震補強，技報堂，pp.84，1998.4.
- 7) (社)プレストレストコンクリート技術協会：PC構造物耐震設計規準（案），1999.12.
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，2002.3.

(2004 年 9 月 17 日受付)