

[208] 立体 RC ラーメン構造物におけるねじりモーメントの影響について

正会員 ○出雲 淳一 (東京大学工学部)

正会員 上田 多門 (東京大学工学部)

郭 翠英 (東京大学大学院)

1. はじめに

コンクリート構造物の設計において、ねじりが発生しないように、また発生しても曲げ、せん断に比べ、その影響が無視できる構造設計を行うのが原則である。しかし、立体的な構造物の場合、構造物の対称性が崩れることにより、構造物全体の変形の適合条件によってねじりが発生し、しかも部材の設計上その影響を無視できない場合もある。立体構造物の非対称性により、ねじりが発生する要因として、(1)設計での仮定と実際の構造物との条件が異なり柱まで土盛りがあり、実際の柱の長さが短くなる場合、(2)乾燥収縮、地震等により、構造物築造後一部の部材の剛性が低下する場合等が挙げられる。設計においては、もともと対称構造物なのに、予期せぬ理由により実際には非対称構造物になってねじりが発生する場合、その影響が構造物の使用状態、終局状態に悪影響を及ぼさぬよう留意する必要があると考えられる。

本研究は、実際のRCラーメン高架橋を想定し、構造物の非対称性によって生じるねじりの影響を調べるためにパーソナル コンピューターを用いてモデルシミュレーションを行うことにより、検討を行ったものである。

2. 線形解析

2. 1 解析条件

本解析においては、参考文献¹⁾の立体ラーメンプログラムをパーソナルコンピューターで行うためにBASIC言語に書き換えて用いた。また、解析に用いた構造物の寸法、断面形状、および材料特性は、「限界状態設計法指針(案)」²⁾のRCラーメン高架橋の設計例に基づき、図-1~図-2、表-1~表-2に示す値を用いた。また、表-3には、参考のために部材の断面係数を示した。

解析ケースとしては、柱・梁の部材剛性の低下が他の部材に及ぼす影響を調べるために部材1、および部材8の剛性を初期剛性の1/10まで、5段階に変化させたもの(ケース1、ケース2)、柱長が変化することによる他の部材への影響を調べるために部材1の長さを構造物が対称である場合の柱長の1/4、1/3、1/2、2/3、および3/4の5段階に変化させたもの(ケース3)、およびねじりが作用している部材のねじり剛性の低下が、他の部材に及ぼす影響を調べるために部材1のねじり剛性を初期ねじり剛性の1/10まで、5段階に変化させたもの(ケース4)を行った。

また荷重は節点1、および節点2に水平力のみを作用させ、ケース1~ケース3の場合には、対称荷重($P_1 = P_2 = 50t$)、ケース4の場合には、非対称荷重($P_1 = 50t$, $P_2 = 10t$)を作用させた。

2. 2 解析結果及び考察

図-3~図-6は、各ケースの場合の各部材のねじり

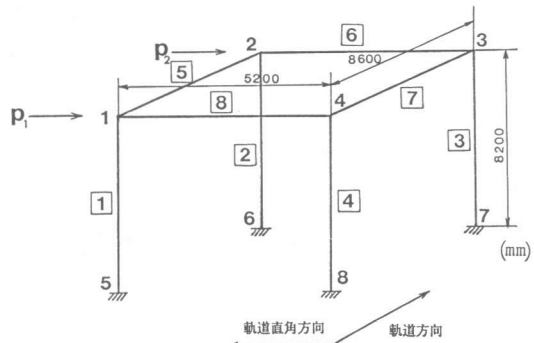


図-1 RCラーメンの寸法

表-1 部材断面寸法

部材	B (cm)	b (cm)	t (cm)	h (cm)	d ₁ (cm)	d ₂ (cm)	A _{s1} (cm ²)	A _{s2} (cm ²)	s (cm)	A _w (cm ²)
1~4		90		90	7.9	7.9	79.4	79.4	30.0	3.80
5, 7	325	80	28	130	9.9	10.2	63.5	87.4	20.0	5.07
6, 8	240	80	28	120	11.9	7.8	64.2	38.6	12.5	2.54

s : せん断補強鉄筋の間隔
A_w : 1組のせん断補強鉄筋の断面積

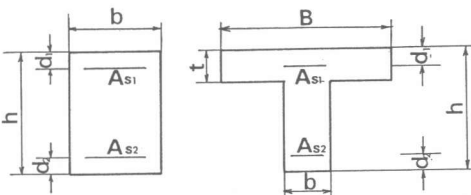


図-2 部材断面

りモーメント、および曲げモーメントの変化を示したものである。尚、曲げモーメントの値は、部材の部材端モーメントの平均値で表した。

ケース1の場合、部材剛性を低下させた部材1、および部材8の曲げモーメントは、部材1の剛性低下に伴い減少するが、他の部材は、増加の傾向が見られる。部材8の曲げモーメントが減少するのは、節点4での曲げモーメントは増加する傾向があるが節点1では部材1と節点を共有するために曲げモーメントが減少し、見かけ上、曲げモーメントが減少するためと考えられる。また、ねじりモーメントは、部材1の剛性低下に伴って増加し、部材1、2、3および4に平均して発生している。

ケース2の場合、ねじりモーメントは部材8の剛性が低下するに伴って増加し、特に部材5および部材7は他の部材に比べ比較的大きなねじりモーメントが発生している。

ケース1、およびケース2のいずれの場合にも、部材剛性が低下することにより構造物が非対称構造物になり、変形適合によるねじりが発生し、しかも部材剛性が低下するに伴って増加する傾向にある。

本解析に用いた構造物が、対称と考えられる場合、水平力 $R = P_2 = 8.5 \text{ t}$ が作用する時に部材6および部材8が曲げ終局状態に達する。いま部材1の剛性が $1/3$ (部材1の曲げ終局時の剛性) に低下していたと仮定すると、最大ねじりモーメントは部材1、2、3、および4に、ねじりひびわれ発生モーメントの約13%発生することになる。

また、部材8の剛性が $1/8$ (部材8の曲げ終局時の剛性) まで低下していたと仮定すると、最大ねじりモーメントは部材5に、ねじりひびわれ発生モーメントの約33%発生することになる。

ねじりの発生状況はケース1の場合には、ねじりは部材1、2、3、および4に平均的に作用し、ケース2の場合には、他の部材に比べむしろ部材5、7より大きなねじりが作用している。これは、ケース1の場合には部材1の剛性が低下することにより、節点1と2、および節点3と4との間に生じる相対変位を拘束しようとするために、部材1、2、3、および4にねじりモーメントが発生するため、ケース2の場合には、部材8の剛性が低下することにより部材6と8と間のたわみ角に差異が生じるために、主に部材5、および7にねじりモーメントが発生するものと考えられる。

図-5は、ケース3の場合のねじりモーメントの変化の状況を示したものである。部材1の柱長が短くなることにより、部材1、2、3、および4には他の部材に比べ大きなねじりモーメントが生じている。しかし、柱長が短くなることによるねじりの影響は部材1が一番大きく、しかも柱長が短くなる程著しいことが認められる。

図-6は、ケース4の場合のねじりモーメントの変化の状況を示したもので、この場合非対称荷重によりねじりモーメントを発生させている。ねじり剛性を低下させた部材1のねじりモーメントは低下する傾向が見られるが、

表-2 材料特性

コンクリート	鉄筋
$E = 3.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ $G = 1.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ $f_c = 270 \text{ kg/cm}^2$ $f_t = 24 \text{ kg/cm}^2$	$E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ $f_y = 3500 \text{ kg/cm}^2$

表-3 断面係数

部材	$J_t \times 10^6$ (cm^4)	$J_{tc} \times 10^5$ (cm^4)	$I_g \times 10^6$ (cm^4)	$I_u \times 10^6$ (cm^4)	I_g/I_u	剛比
1~4	9.25101	2.08356	6.77894	2.05600	3.3	1.0
5、7	12.9792	4.14069	29.2263	5.89743	5.0	4.1
6、8	10.9363	2.19638	19.7417	2.43550	8.1	4.6

J_t : ねじりひびわれ発生前のねじり変形係数
 J_{tc} : 終局時のねじり変形係数
 I_g : 全断面の断面二次モーメント
 I_u : 終局時の断面二次モーメント

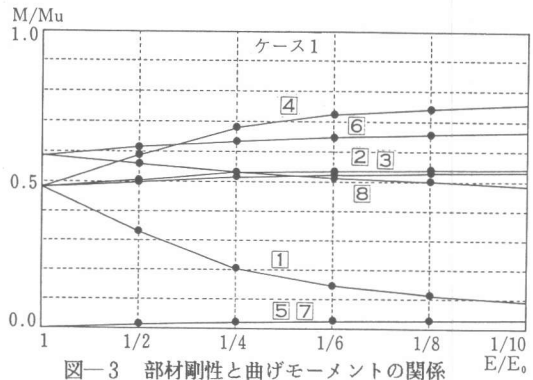


図-3 部材剛性と曲げモーメントの関係

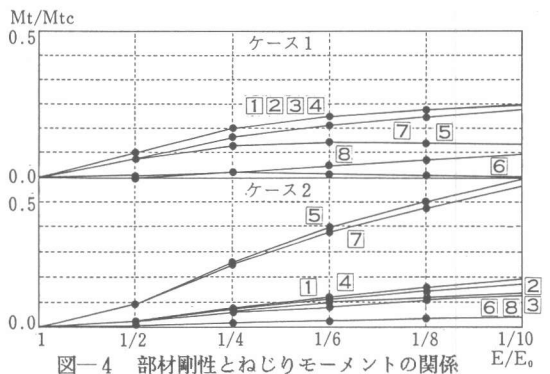


図-4 部材剛性とねじりモーメントの関係

他の部材のねじりモーメント、および曲げモーメントの変化はほとんど見られない。すなわち、ねじり剛性の低下が他の部材に与える影響は極めて小さく、終局時の変形適合ねじりを設計上無視しても、部材の曲げ耐力がねじりが作用しても変化しないと仮定すれば、構造物の曲げ終局耐力にはあまり影響がないと考えられる。

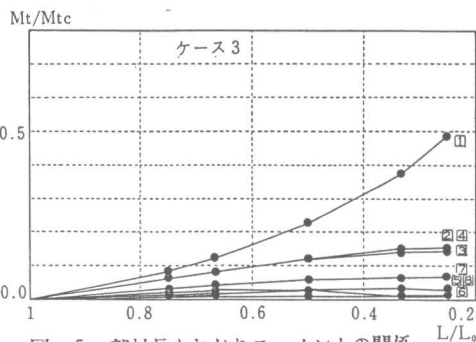


図-5 部材長とねじりモーメントの関係

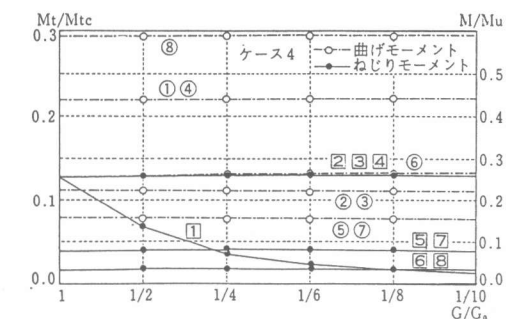


図-6 ねじり剛性とねじりモーメント・曲げモーメントの関係

3. 非線形解析

線形解析では、一部材の剛性の変化に着目して、構造物に発生するねじりについて調べた。しかし、構造物が終局に至る過程においては、ひびわれ発生後は各部材の剛性が各荷重段階において変化するため、線形解析とは異なる結果が出る事が予想される。従って、立体的な構造物のねじりについて非線形解析でも行い、線形解析と比較検討を行ってみた。

3. 1 解析条件

曲げひびわれ発生後の断面二次モーメントは、式(1)に示すBranson³⁾の提案式を部材全体に渡って積分した値を用いて解析を行った。

$$I_e = (M_c / M)^4 \cdot I_g + [1 - (M_c / M)^4] \cdot I_c \quad (1)$$

但し M_c : 曲げひびわれ発生モーメント

I_c : 引張部分のコンクリートを除いた断面二次モーメント

解析にあたっては、ある荷重ステップに対し、材端モーメントから式(1)を用いて断面二次モーメントを仮定し、仮定した断面二次モーメントが収束するまで繰り返し計算を行った。解析ケースとしては、部材1の長さをケース3の場合と同じく5段階に変えたもの(ケース5)、および非対称荷重($P_2 = 1/5 \cdot P_1$)を作用させたもの(ケース6)の2ケースである。ケース5の場合、初期荷重として、 $P_1 = P_2 = 10 \text{ t}$ を作用させ、その後は荷重増分を $\Delta P_1 = \Delta P_2 = 2 \text{ t}$ として解析を行い、ケース6の場合には、初期荷重として、 $P_1 = 10 \text{ t}$ 、 $P_2 = 2 \text{ t}$ を作用させその後は荷重増分として、 $\Delta P_1 = 2 \text{ t}$ 、 $\Delta P_2 = 0.4 \text{ t}$ として解析を行った。計算はいずれかの部材にねじりひびわれが発生する状態あるいは、部材の曲げ終局状態に達するまで行った。

3. 2 解析結果および考察

図-7は、ケース5の場合の部材1の柱長の変化に対する最大ねじりモーメントの変化の様子を示したものである最大ねじりモーメントは、いずれの場合にも柱長が短くなる部材1に発生し、柱長が1/

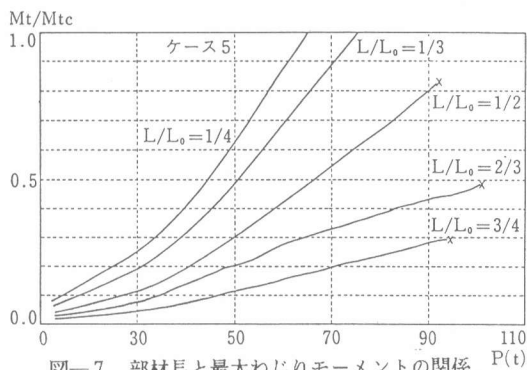


図-7 部材長と最大ねじりモーメントの関係

2、2/3、および3/4の場合には、ねじりモーメントが、ねじりひびわれ発生モーメントに達する以前に部材1が曲げ終局状態に達し、柱長が1/3、および1/4の場合には、部材が曲げ終局状態に達する以前に部材1にねじりひびわれが発生する結果となった。

また、部材にねじりひびわれ発生モーメントが発生する時あるいは、部材が曲げ終局状態に達した時のねじりモーメントの値は、線形解析で求めたねじりモーメントの値の1.7~2.1倍であった。

図-8は、ケース6の場合の解析結果を示したものである。ケース6の場合、終局状態に至るまでに

部材1、4一部材2、3一部材8一部材6の順に曲げひびわれが発生し、ケース5の場合と同様にねじりモーメントの増加にも非線形性が見られる。部材に作用するねじりモーメントは、部材1、2、3、および4が最大で、終局時においては、ねじりひびわれ発生モーメントの約68%に達しており、またその値は弾性計算から求めたねじりモーメントの値の2.2倍であり非線形解析で求まる曲げ終局状態に達した時の荷重は、部材の線形解析により求まる値の0.8倍であった。

以上、線形解析と非線形解析とでは、ねじりモーメントの解析において、曲げモーメントに比べかなりの差が見られ、ねじりモーメントを構造物の設計において考慮する場合に、線形解析ではねじりモーメントを過少評価すると考えられる。

4. あとがき

本研究により、立体的なRCラーメンの設計では予想しえずに生ずる構造的非対称性によって発生するねじりが、部材の設計において支配的なねじりモーメントとなり得ることを明らかにした。数少ないモデルシュミレーションであるが得られた結果を示すと以下の通りである。

- (1) 一部の部材の曲げ剛性が低下している場合には、本解析モデルでは、曲げ剛性が最も高い梁の曲げ剛性が低下した場合に最も大きいねじりモーメントが発生するものと考えられる。
- (2) 柱部材が短くなる場合には、短くなった柱部材にねじりモーメントが集中し、しかも短くなる程にその傾向は著しくなる。
- (3) 変形適合ねじりが部材に発生し、ねじり剛性が低下しても他の部材に及ぼす影響は小さい。従って、変形適合ねじりは曲げ終局時の断面算定には無視しても差し支えないと考えられる。
- (4) 非線形解析から、柱部材が短くなる場合に、曲げ部材が終局状態に達する以前にねじりひびわれが発生するなど、部材の設計にねじりを無視できない場合もあることが確かめられた。
- (5) 非線形解析で得られる曲げ終局時の最大ねじりモーメントは、線形解析で得られるものの約2倍に達する場合もあることが確かめられた。

参考文献 (1)F.W.ビューフェ/W.H.ローアンJr. /P.G.ホードレイ/R.M.ハケット共著：成岡昌夫 訳
「コンピュータによる骨組構造解析」 培風館

(2)コンクリート・ライブラリー 第52号

「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」p360~P369 昭和58年11月 土木学会

(3)Branson, Dan.E. "Instantaneous and Time-Dependent Deflection on Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams", Report No.7, Alabama Highway Department Bureau of Public Roads Montgomery, Aug. 1963, p24

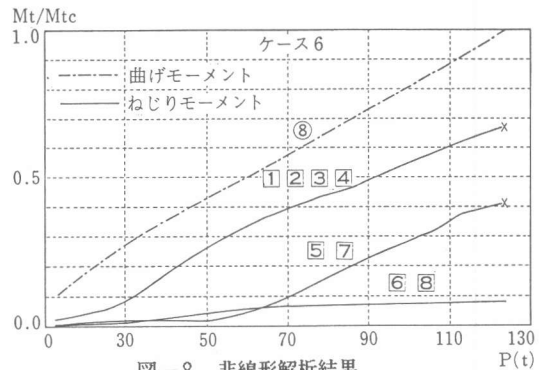


図-8 非線形解析結果