

論文

[2124] 高強度鉄筋コンクリートはりのひびわれ発生後の曲げ剛性

滝本和志^{*1}・大内 一^{*2}・峯岸孝二^{*3}・塩屋俊幸^{*4}

1. はじめに

温度勾配を受ける鉄筋コンクリート部材の設計においては、ひびわれの発生及びクリープを考慮し、曲げ剛性を低減させて温度応力を算定している。本研究は、材料強度と試験体温度をパラメータにした鉄筋コンクリートはりの曲げ実験結果[1][2]に基づき、設計基準強度600kgf/cm²の高強度コンクリート及び高強度鉄筋(SD490)を用いた場合に、ひびわれ発生に伴って曲げ剛性がどのように変化するかを明らかにし、温度荷重が支配的な部材の設計をより合理的、経済的に行えるよう検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 試験体

試験体一覧を表-1に、形状寸法・配筋を図-1に示す。試験体は全て断面45cm×60cm、長さ6mとした。試験パラメータは、コンクリートの設計基準強度 ($f'_{ck}=300,600\text{kgf/cm}^2$)、鉄筋強度 (SD345,SD490)、試験体温度 (常温,低温) とした。

2. 2 使用材料

コンクリートの配合を表-2に示す。高強度コンクリートの配合にはマスコンクリート構造物への適用を考慮して低熱スラグセメントを使用した。また、水セメント比低減の目的で高性能AE減水剤を用いた。

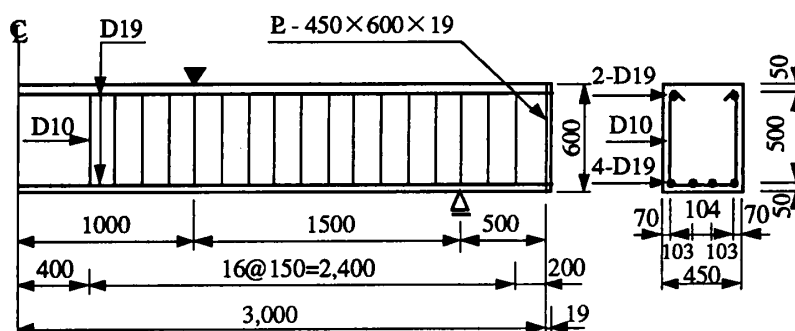


図-1 試験体形状寸法・配筋

表-1 試験体一覧

試験体名	コンクリート		主鉄筋			せん断補強筋		
	設計基準強度 f'_{ck} (kgf/cm ²)	セメントの種類	品質	本数・径	鉄筋比 (%)	品質	径・間隔	鉄筋比 (%)
MN-345-600 ML-345-600	600	低熱スラグセメント	SD345	4-D19	0.46	SD345	D10 @150	0.21
MN-345-300	300	普通ポルトランドセメント				SD490		
MN-490-600	600	低熱スラグセメント	SD490			SD490		

MNは常温、MLは低温、345,490は鉄筋品質、600,300はコンクリート設計基準強度を示す。

- *1 滝本和志 清水建設(株)技術研究所構造技術研究部、工修 (正会員)
 *2 大内 一 (株)大林組技術研究所主任研究員、工博
 *3 峯岸孝二 東京ガス(株)生産技術部工場建設グループ課長
 *4 塩屋俊幸 清水建設(株)技術研究所構造技術研究部主任研究員、工博 (正会員)

普通強度コンクリートには普通ポルトランドセメントを用いた。

鉄筋は熱間圧延異形棒鋼SD345、SD490、呼径D10、D19を用いた。D10鉄筋はせん断補強筋に、D19鉄筋は主筋にそれぞれ用いた。

2. 3 載荷方法

支持条件は支点間距離 5 m の両端単純支持とし、純曲げ区間 2 m の 2 点載荷とした。低温試験体は試験体の上面以外を全て覆う低温槽（冷媒は液体窒素）内に入れ、試験体下面を 24 時間かけて所定の温度まで冷却し、さらに 24 時間保冷後実験を行った。温度条件は引張側を -40°C 、圧縮側を常温とし、試験体高さ方向に温度勾配を付けた。温度管理は試験体下面から 1 cm のところに埋め込んだ T 熱電対を用いた。実験開始時における試験体高さ方向の温度勾配は、ほぼ直線になっていた。

3. 材料試験結果

3. 1 コンクリート

材令 9 1 日のコンクリートの材料試験結果を表 - 3 に示す。低温試験は供試体を低温槽（冷媒は液体窒素）内に入れ冷却した。温度管理は供試体と同一条件のダミー供試体を作り、その供試体の中心部と側面の位置に T 熱電対を配置し、 10°C 以上の温度差とならないよう半日程度で所定の温度まで冷却し、24 時間保冷後試験を行った。

圧縮強度と弾性係数の関係を図 - 2 に示す。実線は土木学会コンクリート標準示方書[3]の規定である。普通強度コンクリートの実験結果は示方書の規定によく一致している。示方書では $f_{ck}=600\text{kgf/cm}^2$ までの規定しかなく、示方書の適用範囲外ではあるが、高強度コンクリートの弾性係数を示方書より外挿すると、常温、低温ともに実験値の方が若干大きくなっている。

また、低温下における圧縮強度増加量は普通強度コンクリート[4]の場合に比べて小さくなっている。これ

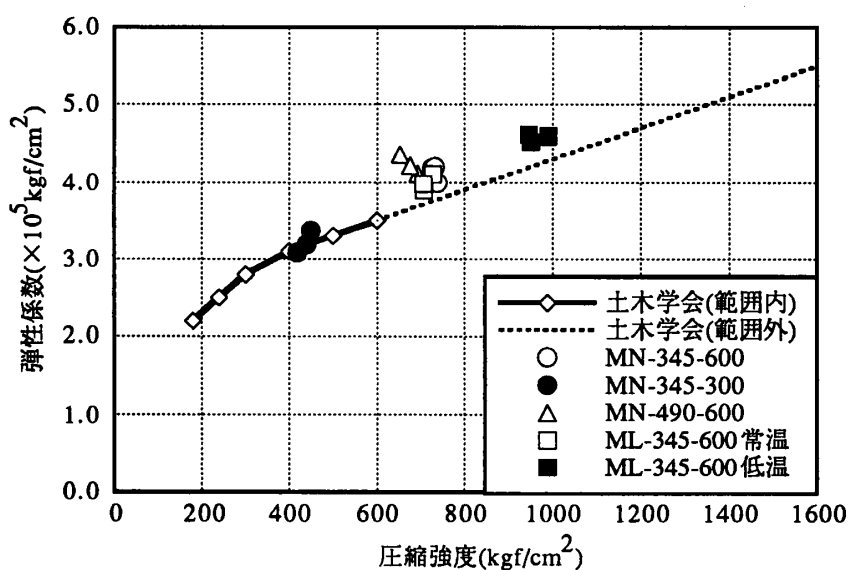


図 - 2 圧縮強度と弾性係数の関係

表 - 2 コンクリートの配合

試験体名	水セメント比 W/C (%)	細粗骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					高性能 AE 減水剤 C×%
			水 W	セメント C	砂S		砂利 G	
					粗砂 SL	細砂 SS		
MN-345-600 MN-490-600 ML-345-600	32.0	37.1	170	531	357	237	1037	2.0
MN-345-300	53.8	44.5	161	299	494	329	1055	0.35

は、高強度コンクリートの場合、水セメント比が小さいため混入した水はほとんどが水和反応に使われ、低温下圧縮強度増加に必要な余剰水が少ないためであると考えられる[2]。

3. 2 鉄筋

鉄筋の引張試験結果を表 - 4 に示す。低温試験は引張試験機に低温槽を取付け、所定の温度まで冷却した後引張試験を実施した。T 熱電対を埋め込んだダミー供試体を低温槽にいっしょに入れて温度管理を行った。SD490 - D19鉄筋の伸びが11%と小さくなったが部材実験で破断することにはなかった。D10鉄筋は低温になると伸びが大きくなっているが、D19鉄筋には変化はみられない。弾性係数は $1.90 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ 前後の値となり、従来の鉄筋引張試験結果[4]と同様である。

4. 実験結果と考察

4. 1 概要

実験結果の一覧を表 - 5 に示す。

計算値は示方書に基づいて算定したものである。但し、コンクリートの曲げ引張強度は寸法効果[5]を考慮して求めた。ひびわれ発生荷重は計算値の方が若干大きくなっている。ML-345-600試験体は低温槽の中にあるため目視によるひびわれ発生荷重は求められなかったため、主筋ひずみの値より推定した。また、計算値は低温時の曲げ引張強度[4]を用いて求めた。降伏荷重は計算値と実験値がよく一致している。最大荷重は実験値の方が2割程度計算値を上回っている。これは、示方書が鉄筋のひずみ硬化を考慮していないためと考えられる。

降伏変位及び最大変位は試験体中央における値を用いた。最大変位の降伏変位に対する比を塑性率と定義する。主鉄筋比が0.46%と比較的低鉄筋比なので、塑性率は7～18と

表 - 3 コンクリート材料試験結果

試験体名	圧縮強度 (kgf/cm^2)	弾性係数 ($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)	ポアソン比
MN-345-600	743	4.12	0.26
MN-345-300	448	3.28	0.25
MN-490-600	675	4.16	0.25
ML-345-600	714 (962)	3.99 (4.58)	0.23 (0.27)

() 内は低温試験結果を示す。

表 - 4 鉄筋引張試験結果

鉄筋		降伏点 f_{sy} (kgf/cm^2)	引張強度 f_{su} (kgf/cm^2)	伸び (%)	弾性係数 E_s ($\times 10^6 \text{kgf/cm}^2$)
品質	径				
SD345 (常温)	D10	3620	5370	18	1.90
	D19	4110	5770	18	1.92
SD345 (-40℃)	D10	4250	6100	28	2.05
	D19	4720	6370	18	1.92
SD490 (常温)	D10	4970	6530	15	1.89
	D19	6190	8180	11	1.94

表 - 5 実験結果一覧

試験体名	曲げひびわれ 発生荷重 (tonf)		降伏荷重 (tonf)		降伏変位 δ_y (mm)		最大荷重 (tonf)		最大変位 δ_{max} (mm)	塑性率 δ_{max} / δ_y
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値		
MN-345-600	16.0	16.2	30.9	32.3	13.9	12.0	40.4	32.7	262.3	18.9
MN-345-300	9.0	10.8	30.1	29.8	13.3	12.5	36.7	31.5	169.6	12.7
MN-490-600	12.0	15.0	45.9	46.7	23.3	18.7	56.9	48.9	162.2	7.0
ML-345-600	25.0	38.2	38.8	34.4	10.5	15.2	45.0	36.2	170.0	16.2

なり十分な靱性を示している。MN-490-600試験体は他の試験体に比べて降伏変位が大きいために塑性率は小さくなっている。

図 - 3 に各試験体の荷重 - 変位関係を示す。最大荷重は大きい方から高強度鉄筋を用いたMN-490-600試験体、低温のML-345-600試験体、基準となるMN-345-600試験体、普通強度コンクリートを用いたMN-345-300試験体の順であった。MN-345-600試験体とMN-345-300試験体はMN-345-300試験体の破壊時点までほぼ同様の動きを示している。図 - 4 にML-345-600試験体の変位分布を示す。破壊直前を除いて支間中央部に関してほぼ対称な変位分布となっている。

4. 2 ひびわれ性状

各試験体の最終的なひびわれ状況を図 - 5 に示す。常温の試験体においては純曲げ区間内に曲げひびわれが発生した後、せん断スパン内でも20tonf過ぎに曲げせん断ひびわれが発生した。純曲げ区間内の曲げひびわれは、圧縮縁で斜めから水平へと成長し、その外側部分のコンクリートが圧壊した。ML-345-600試験体は加力中の状況はわからないが、最終ひびわれ状況を常温試験体と比較するとせん断スパン内の曲げせん断ひびわれが少ないのが目立つ。これは低温下におけるコンクリート引張強度の増加によるものと考えられる。最終的には純曲げ区間内においてコンクリート上縁部の表面から5cm厚のコンクリートが剥離するようなかたちで破壊を生じている。純曲げ区間内の曲げひびわれ性状には材料強度及び試験体温度の違いによる顕著な影響はみられない。

4. 3 剛性残存率

ひびわれ発生後の曲げ剛性の低下を表す指標として剛性残存率[6]（ひびわれ発生後の曲げ剛性を常温下全断面有効時の曲げ剛性で除した値）を用いる。ひびわれ発生後の曲げ剛性は、荷重より求めた曲げモーメントをスパン中央部と加力点

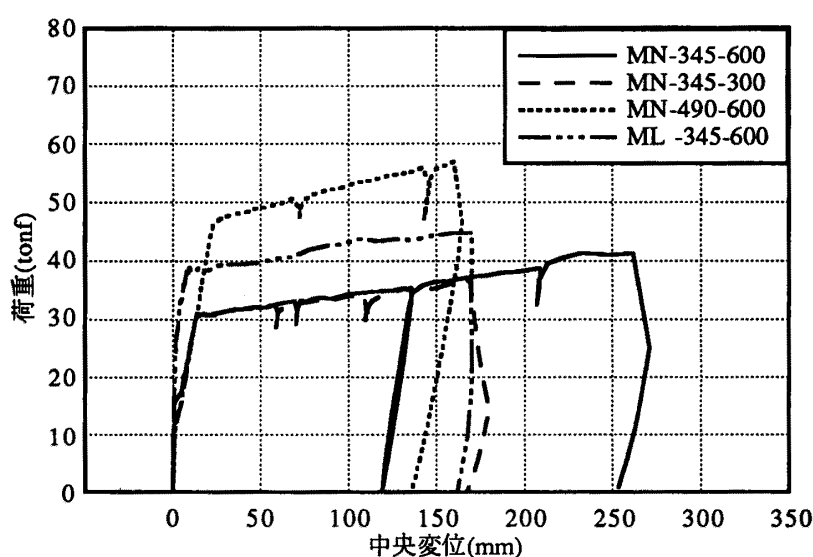


図 - 3 荷重 - 変位関係

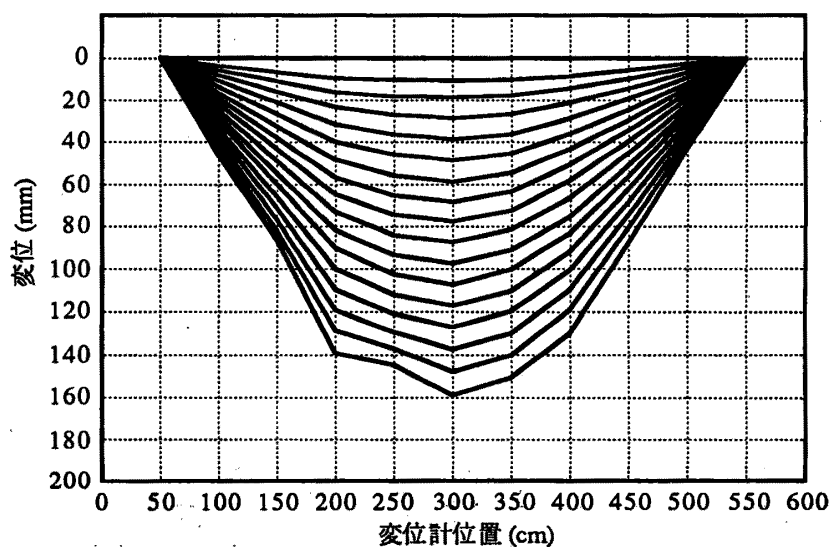


図 - 4 変位分布図(ML-345-600)

の3点の鉛直変位より求めた曲率で除して求めた。常温下全断面有効時の曲げ剛性は初期加力時の変形が非常に小さいために、材料試験より求めた弾性係数と鉄筋を考慮して求めた断面2次モーメントより求めた。

剛性残存率と主筋ひずみとの関係を図-6に示す。主筋ひずみの値は鉄筋の上下に貼った2枚のひずみゲージの平均とし、純曲げ区間内に貼ったひずみゲージの中で最初に降伏した点のデータを用いた。各試験体ともに200 μ 付近より剛性残存率が急激に低下して降伏以降はほぼ一定の値を示している。この勾配が緩やかな試験体もあるが、これはひびわれ発生と同時にひずみが急激に増加しているためである。鉄筋の降伏ひずみはSD490が3190 μ 、SD345（常温）が2140 μ 、SD345（低温）が2460 μ

であるから、各試験体ともに鉄筋が降伏する時点では最初の剛性の20%程度まで減少することがわかる。

MN-345-300試験体とMN-345-600試験体を比較すると、高強度コンクリートを用いた試験体の方がひびわれ発生に伴う剛性の低下が急激で一気に初期剛性の20%程度まで低下している。これは高強度コンクリートの方がひびわれ発生荷重が大きいために、ひびわれ発生と同時に鉄筋に大きなひずみが生じているためと考えられる。降伏時点での剛性残存率はMN-345-300試験体の方が若干大きくなっている。鉄筋強度による剛性残存率の違いはあまりみられない。但し、MN-345-600試験体の場合、降伏後剛性残存率が徐々に低下しているのに対して、MN-490-600試験体の降伏後の剛

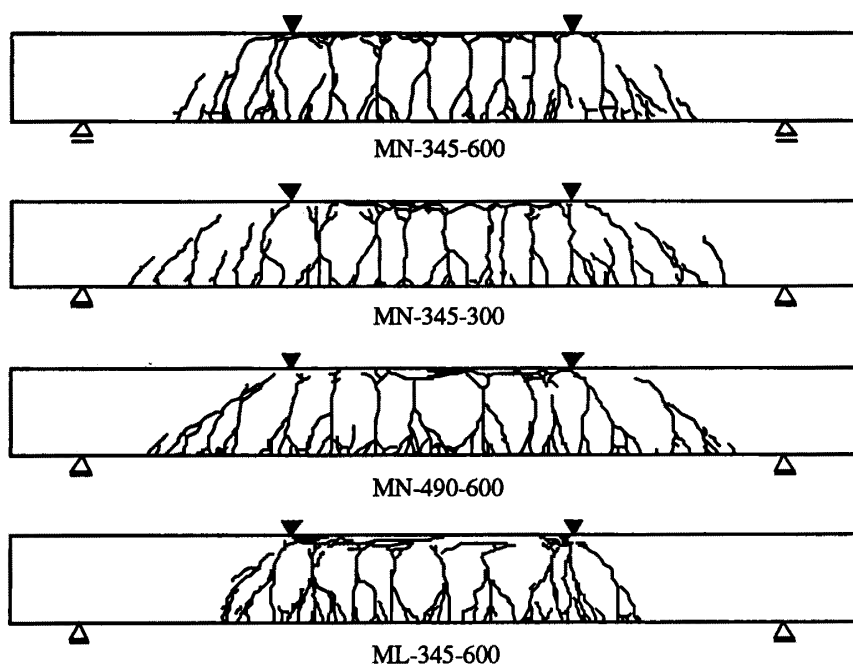


図-5 ひびわれ状況

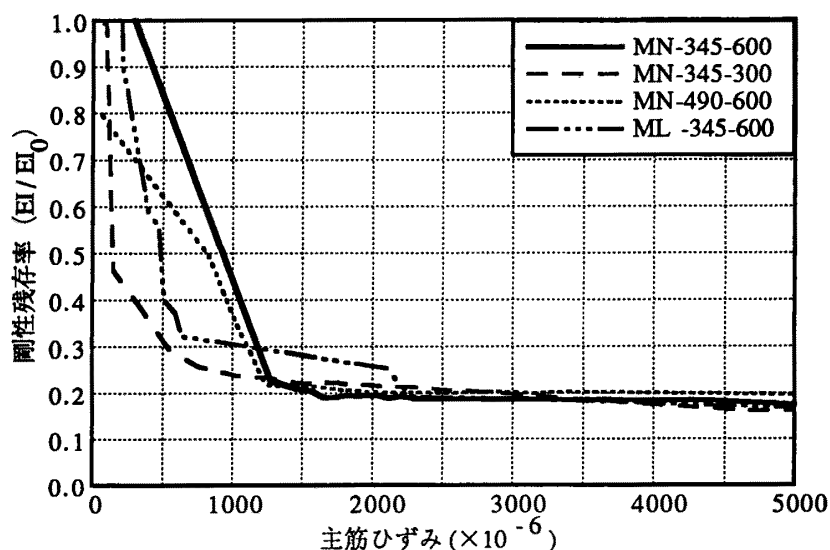


図-6 剛性残存率

性残存率はほぼ一定値を保っている。

ML-345-600試験体は主筋降伏前に剛性残存率が30%の付近で一度棚ができています。この棚は常温試験体では20tonf過ぎに曲げせん断ひびわれが発生しているのに対して、低温試験体ではほとんど発生していないことによるものと考えられる。しかし、鉄筋降伏以降は常温試験体と同様の動きをしている。

以上のように剛性残存率は、主筋降伏前は試験体ごとに若干違う動きがみられるものの、降伏時点では各試験体ともにほぼ20%まで低下しており、降伏後は15～20%の間で同様の動きを示している。

5. まとめ

高強度コンクリート及び高強度鉄筋を用いた鉄筋コンクリートはりの曲げ実験を実施し、曲げ剛性に注目して検討した結果以下のような知見を得た。

- ①剛性残存率はひびわれ発生後急激に低下し、鉄筋降伏時点では初期剛性のほぼ20%程度まで低下する。
- ②今回の実験の範囲内においては、剛性残存率は主筋降伏以降、材料強度や試験体温度の影響はほとんど受けていない。
- ③温度応力の算定において、高強度コンクリート及び高強度鉄筋を用いた場合もひびわれ発生を考慮して曲げ剛性を低減して計算してよいものと考えられる。

【謝辞】本研究は東京ガス、大林組、鹿島、清水建設の共同研究であり、本研究を御指導頂いた東京大学土木工学科岡村甫教授に対してここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 谷口 勝ほか：高強度コンクリート・高強度鉄筋を用いたRCはりの曲げ実験、土木学会第46回年次学術講演会、pp.690-691、1991.9
- [2] 塩屋俊幸ほか：低熱スラグセメントを用いた高強度鉄筋コンクリートの低温時特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp.553-558、1992.6
- [3] 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編、1991.9
- [4] 岡田武二ほか：極低温下におけるコンクリート部材の曲げ特性、コンクリート工学、Vol.15、No.11、1977
- [5] 塩屋俊幸：大型鉄筋コンクリート部材のせん断特性に関する研究、清水建設研究報告別冊、第25号、1989.2
- [6] 金津 努・青柳征夫：低温領域で温度勾配を受ける鉄筋コンクリート部材の曲げ剛性とひびわれ性状、電力中央研究所報告、1980.11