

# [116] 貫通ひびわれが鉄筋コンクリートはりの挙動に及ぼす影響について

正会員 関 博 (早稲田大学理工学部)

正会員 ○長谷川 俊昭 (早稲田大学大学院)

## 1 まえがき

鉄筋コンクリート構造物において、収縮の拘束や正負曲げなどの原因で、全断面を貫通するひびわれが発生することがある。しかし、このような貫通ひびわれが部材の力学的挙動、部材耐力などを与える影響や安全性の評価方法は、明確になっておらず、実用上の課題の一つとなっている。

そこで本研究では、RC単純はりを対象として、正負の曲げモーメントを作用させることによってスパン中央断面に貫通ひびわれを発生させた後、二点荷重試験を実施して、純曲げ区間における貫通ひびわれが、はりの挙動や耐力に及ぼす影響について実験的に検討した。

## 2 実験方法

試験体は、上下対称配筋の長方形断面はりであり、貫通ひびわれを発生させるB1～B6の6体と発生させないA1～A6の6体に分類される。試験体の諸元を表-1に示す。図-1のように、スターラップは純曲げ区間に配筋せず、B試験体のスパン中央下縁には深さ1cmのノッチを設けて、貫通ひびわれの位置が明確となるようにした。

B試験体の荷重は、以下の順序とした。まず第1荷重としてスパン中央に一点集中荷重を行い、ノッチからひびわれを発生させた後、試験体の上下を反転し、第2荷重として再びスパン中央に一点荷重を行い、ひびわれを貫通させた。なお第1荷重の上限荷重は、計算上、引張鉄筋ひずみが降伏点ひずみの80%となるように定め、第2荷重の上限荷重もそれと同一にした。計算で使用した応力-ひずみ曲線を図-2に示す。このようにして貫通ひびわれを発生させたB試験体を再び反転して二点荷重を行い、破壊に至るまで荷重試験を継続した。A試験体については、二点荷重のみを行い、貫通ひびわれの有無による相違を検討することにした。

測定項目は、スパン中央断面の鉄筋のひずみ(ストレインゲージ使用)、純曲げ区間のコンクリートのひずみ(箔ゲージ使用)、スパン中央のたわみ(ダイヤルゲージ使用)、スパン中央はり側面の変位(測長約70mmのクリップ型変位計使用)、ひびわれ状況などである。

表-1 試験体の諸元

試験体	引張鉄筋比 (%)	貫通ひびわれ	鉄筋降伏強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	コンクリート強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	鉄筋指数
A1	1.02	無	3682	620	0.121
A2	1.03	無		620	0.122
B1	1.05	有	3682	587	0.132
B2	1.03	有		587	0.129
A3	1.61	無	3778	541	0.171
A4	1.62	無		510	0.177
B3	1.61	有	3778	541	0.177
B4	1.66	有		510	0.169
A5	2.34	無	3390	532	0.179
A6	2.29	無		465	0.187
B5	2.34	有	3390	532	0.184
B6	2.37	有		465	0.181

注: ① 試験体3本の平均値  
② 供試体(φ10×20cm)3本の平均値

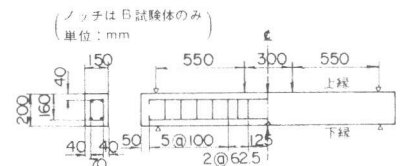


図-1 試験体の寸法と配筋

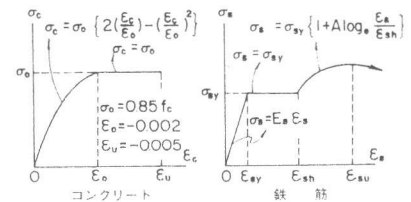


図-2 計算に使用した応力-ひずみ曲線

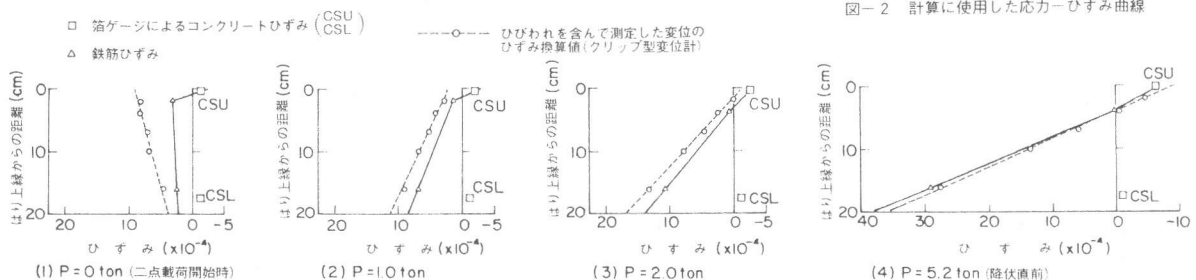


図-3 貫通ひびわれ断面のひずみ分布(B2試験体の二点荷重時)

### 3. 実験結果及び考察

#### 3-1 ひずみの直線分布

二点載荷時における貫通断面内の高さ方向のひずみ分布及び変化状況を図-3に示した。第1及び第2載荷における変位が残留するために、低い荷重領域における鉄筋とコンクリートのひずみは、明らかに直線分布していない。しかし、ひびわれを含んで測定した変位のひずみ換算値が、はり上縁側で0に近づくにしたがって、つまり、ひびわれ幅が減少し圧縮側が閉合するにつれて、コンクリートと鉄筋のひずみは徐々に直線分布するようになり、 $P=2.0\text{ ton}$ の荷重段階において引張側のコンクリートひずみ(CSL)を除き、ひずみはほぼ直線分布するようになった。

#### 3-2 貫通ひびわれの発生と閉合

貫通ひびわれの発生と閉合に伴う引張鉄筋、圧縮鉄筋、コンクリート(CSU, CSL)のひずみ履歴曲線の一例を図-4及び5に示す。本図に示すように第1載荷の除荷後の残留ひずみはかなり大きく、残留ひびわれ面のコンクリートにおいて圧縮力が存在し、残留ひずみによる内部モーメントが発生していると思われる。第2載荷のひびわれ貫通時で引張力を受けている圧縮鉄筋において、ひずみの躍り場状態が観察されたが、これは断面力を圧縮・引張鉄筋対だけで負担するために生じている現象と考えられる。ひびわれ発生後のコンクリートのひずみは、約 $-1 \times 10^{-4}$ 程度の値を示しているが、これは、ひびわれるまで鉄筋によって拘束されていた(乾燥)収縮ひずみが開放されたことが一因と考えられる。

図-6は、貫通時及び二点載荷開始時のひびわれ幅を示しており、B試験体では二点載荷開始時に $0.05\text{ mm}$ 程度の残留ひびわれ幅が認められた。しかし表-2で示したように、鉄筋及びコンクリートには、かなり大きなひずみが残留し、前述したようにそれらは直線分布していない。すなわち貫通断面では、ひびわれ幅が存在しても、ひびわれ面のかみ合い<sup>1)</sup>などのために、コンクリートは圧縮力を受け、鉄筋は引張力を受けていると考えられ、二点載荷開始時にコンクリート及び鉄筋の残留ひずみによる内部モーメント $M_c$ ,  $M_s$ が存在し、これらは $M_c + M_s = 0$ となっていると予想される。そこで貫通断面内のコンクリートの残留ひずみ分布が、ゲージ位置CSUとCSLを通る直線で近似できると仮定し、 $M_c$ と $M_s$ をはり上縁まわりで計算すると表-2のような結果が得られる。ただしコンクリートの応力度 $\sigma_c$ は $E_c \times \epsilon_c$ とし、 $E_c$ は $\frac{1}{3}$ 割線弾性係数を用いた。表-2に示すように必ずしも $M_c + M_s = 0$ とならないことから、貫通断面内のコンクリート残留ひずみは、かなり複雑な分布となっていると考えられる。

二点載荷における鉄筋及びコンクリートのモーメント-ひずみ曲線は、なめらかな連続的变化をしており、圧

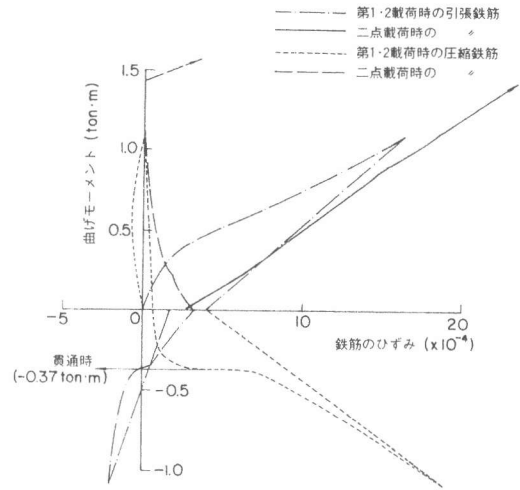


図-4 引張及び圧縮鉄筋のひずみ履歴(B2試験体)

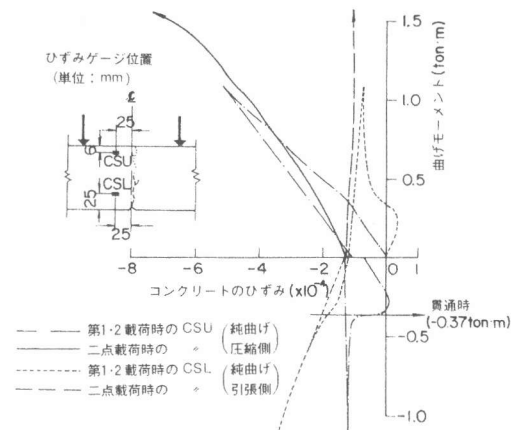


図-5 コンクリートのひずみ履歴(B2試験体)

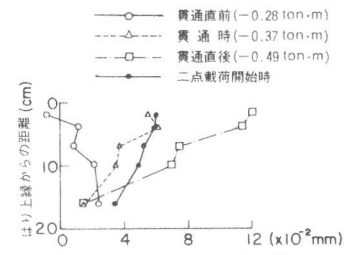


図-6 貫通ひびわれ幅(B2試験体)

表-2 二点載荷開始時の残留ひずみによるモーメント

試験体	二点載荷開始時の残留ひずみ( $\times 10^{-6}$ )				コンクリートモーメント		Mc+Ms (ton-m)
	圧縮鉄筋	引張鉄筋	圧縮側コンクリート(CSU)	引張側コンクリート(CSL)	Mc (ton-m)	Ms (ton-m)	
B1	329	258	-233	-183	-1.75	0.25	-1.50
B2	310	249	-123	-125	-1.12	0.25	-0.87
B3	259	173	-100	-18	-0.31	0.30	-0.01
B4	279	192	-18	-45	-0.31	0.31	0
B5	227	76	-171	-182	-1.58	0.25	-1.33

縮側コンクリートの貫通ひびわれが閉合して剛性が急増するというピンチ効果<sup>1)</sup>は生じていないと思われる。むしろ貫通ひびわれの閉合は、二点載荷開始時のひびわれのかみ合いによる応力状態から始まって徐々に起こっていったと考えられる。

### 3-3 曲率の変化

図-7は、鉄筋ひずみから求めた貫通断面の曲率の履歴を示している。鉄筋ひずみの履歴に対応した貫通時曲率の躍り場の後に、引張側コンクリートの閉合に伴うピンチ効果が急激に生じていると思われる。表-2に示したように、二点載荷開始時の圧縮及び引張鉄筋の残留ひずみは、比較的大きな値であったが、両値の差が小さいため、残留曲率はほとんど0となっている。図-7には、圧縮及び引張鉄筋対によるのみモーメントを負担すると考えて求めた計算曲率 $\varphi_1 = M / A_s E_s (d-d')^2$ 及びコンクリートの引張側を無視して計算した曲率 $\varphi_2$ を併せ図示した。二点載荷の初期の段階でも、ひびわれ面のかみ合いによるコンクリートの圧縮力伝達があるために、実験から求めた曲率は $\varphi_1$ よりかなり小さくなり、荷重の増加とともに閉合が進み、断面剛性は徐々に回復しており、ピンチ効果は生じていない。載荷荷重が増加して、ひずみの直線分布が成立する付近から、曲率の実験値と計算値 $\varphi_2$ の傾きは、ほぼ等しくなっており、ひずみの直線分布の回復=圧縮部のひびわれの完全な閉合=コンクリートの引張側を無視した剛性への回復ということがいえるのである。

図-8には、じん性率 $\mu = \varphi_u / \varphi_y$  ( $\varphi_u$ は破壊時曲率、 $\varphi_y$ は降伏時曲率)の実験値と計算値との比を示した。貫通ひびわれの有る試験体は、無いものと比較して、多少 $\varphi_y$ が小さく、 $\varphi_u$ が大きい傾向にあるようであり、貫通ひびわれの有る試験体の方が、いくらか $\mu$ が大きい値となっているが、貫通ひびわれの無い試験体との差は顕著とはいえない。なお貫通ひびわれの有無によって降伏荷重の実験値と計算値との比に差異は認められなかった。

### 3-4 部材剛性の評価

図-9は、換算断面2次モーメント $I_g$ (全断面有効)がほぼ等しいA3及びB3試験体のスパン中央たわみを示しており、B3についてはACIによる平均断面2次モーメント $I_e$ <sup>3)</sup>を用いて計算したたわみをも示した。貫通ひびわれの有るB3では、載荷初期において部材剛性は小さいが、荷重の増加とともにひびわれの閉合によって剛性が徐々に回復し、ひびわれの発生によって剛性が低下していくA3とまったく対照的である。荷重の増加に対するたわみの増加率は、ひびわれ発生荷重に達するまでB試験体がA試験体のおよそ2倍となっているが、降伏荷重前ではAとBの試験体に大きな差異は認められないように思える。これらのことから、圧縮側のひびわれ閉合により貫通部材の剛性は、貫通ひびわれの無い部材とほぼ同等の程度に回復するのではないかと考えられる。なお、どのB試験体の貫通ひびわれも、純曲げ区間に3本、せん断区間に1、2本ずつ発生していたため、ここでいう部材剛性とは、それらの影響をすべて包括してたわみのみで評価したものである。

図-10には、スパン中央の塑性たわみ $\delta_p$  (=破壊時たわみ $\delta_u$  - 降伏時たわみ $\delta_y$ )<sup>4)</sup>から求めた塑性回転角 $\theta_p = 4\delta_p / (l-a)$ と鉄筋指数 $q$ との関係及び山田が理論的に求めた塑性回転角 $\theta_{py}$ を示した。(  $l$ はスパン長、 $a$ は純曲げ長) 実測値 $\delta_p$ から $\theta_p$ への換算に問題があるために、実験値 $\theta_p$ と $\theta_{py}$ は相違しているが、

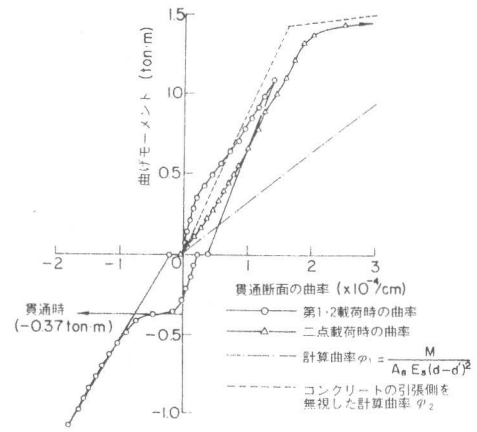


図-7 貫通断面における曲率の履歴(B2試験体)

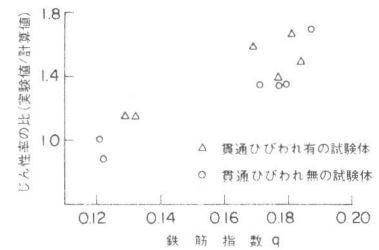


図-8 貫通ひびわれの有無によるじん性率の比

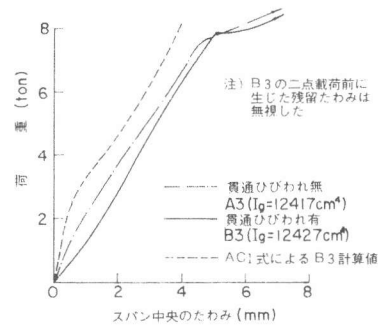


図-9 スパン中央のたわみと荷重の関係

貫通ひびわれの有無にかかわらずqが増加すると塑性回転角が減少するという傾向は存在するようであり、塑性回転角の大きさも貫通ひびわれの有無による差異はないようである。図-11に示したコンクリート圧縮線のひずみ分布の変化を見ると、貫通ひびわれの有る試験体では、貫通ひびわれ間の最大圧縮線ひずみ $\epsilon_{cu}$ は小さく、貫通断面近くで $\epsilon_{cu}$ は大きくなっているの、貫通断面近くでは $\theta_p$ が大きく貫通断面間の $\theta_p$ は小さいと思われるが、貫通ひびわれの無い試験体の圧縮線ひずみはほぼ一樣なので、 $\theta_p$ も一樣分布に近いと思われる。

### 3-5 破壊耐力

試験体は、A, Bすべて曲げ引張破壊であり、引張鉄筋はすべて塑性硬化し、また圧縮鉄筋は破壊時に引張弾性域内もしくは引張降伏の状態にあった。図-2の $\sigma-\epsilon$ 曲線を用いて破壊耐力を計算し、実験値との比をとって貫通ひびわれの有無による相違を検討したが、図-12に示すように差異は認められなかった。なお、破壊後、除荷しても圧縮線での貫通ひびわれは肉眼で観察できないほど完全に閉合していた。

### 4. まとめ

本論文は、正負曲げによって発生させた貫通ひびわれがRCはりの挙動に及ぼす影響を実験的に検討したものである。本実験の範囲では、以下のことが明らかになった。

- (1) 貫通断面では、コンクリート面のかみ合いのためと思われる残留ひずみが大きく、初期にひずみの直線分布は成立しないようである。
- (2) ひびわれ閉合までは、貫通ひびわれの有る試験体の剛性が、無いものに比較して、小さい値となっている。
- (3) 貫通断面の剛性は、ひびわれ閉合とともに徐々に回復していくため、初期の回転能は大きい、じん性率、塑性回転角、破壊耐力については貫通ひびわれの有無による差異は、ほとんど認められない。

謝辞 本実験に御協力頂いた正橋邦夫君(現戸田建設)、増田勝弘君(現前田建設)に謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Park R., Kent D.C., Sampson R.A.: Reinforced Concrete Member with Cyclic Loading, Proc. of ASCE, ST7, July 1972, P.1341~1360
- 2) 界 孝司, 能町純雄, 角田与史雄: RC版の厚さを貫通するひびわれが生じた場合の附加的曲げ変形に関する基礎研究, 土木学会第32回年次学術講演会講演概要集 第5部, V-81, 1977, P.156~157
- 3) A C I Building Code 318-77
- 4) 岡田 清, 小柳 治: コンクリートばかりにおける塑性ヒンジの生成に関する研究, 土木学会論文集 第105号, 1964.5, P.27~35

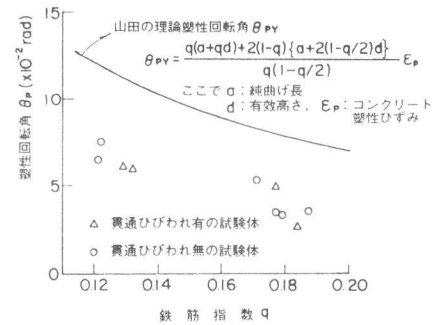


図-10 鉄筋指数と塑性回転角の関係

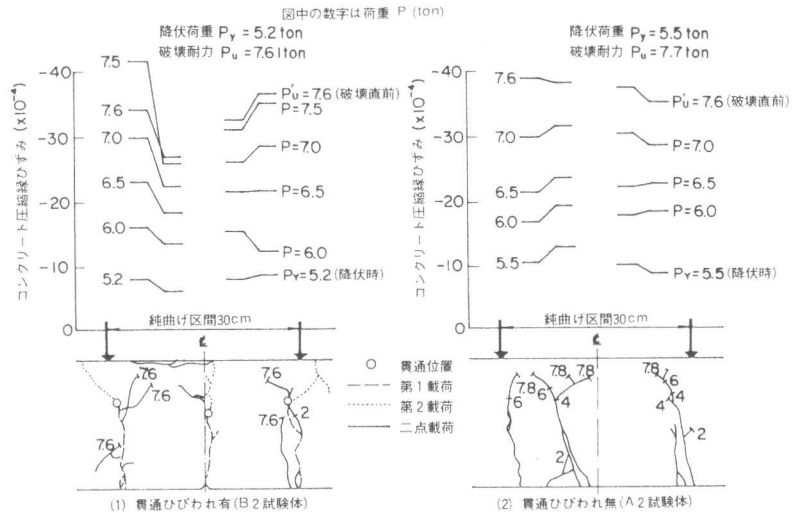


図-11 コンクリート圧縮線ひずみ分布の変化とひびわれ状況

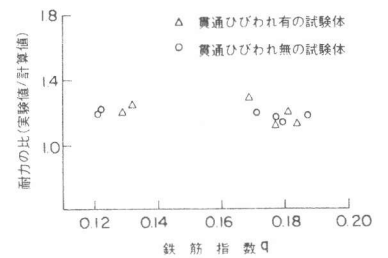


図-12 貫通ひびわれの有無による耐力の比