

# [118] RC有孔ばりの変形モードに関する実験的研究

正会員 ○市之瀬 敏勝 (名古屋工業大学)

Laura Takahashi (元東京大学研究生)

正会員 滝口 克己 (名古屋工業大学)

## 1. 研究目的

従来の鉄筋コンクリート部材実験における変形測定値は次のように分類しよう。

(1)部材全体としての変形……たわみ量、部材端回転角、軸方向変形量など。

(2)部材内の「領域」における変形……ある領域内の平均曲率やせん断変形角など。

(3)部材内の「点」における歪度や変形……鉄筋やコンクリートの歪度、鉄筋のすべり量、ひびわれ幅やひびわれ面のずれなど。

このほか、ひびわれ図や写真も有力な情報である。しかし、例えば鉄筋コンクリート部材のせん断破壊のメカニズムや有効な補強方法を知る目的には、上記(2)の測定を一步進めて、部材が全体として2次元のどのような変形状態にあるかを測定することも重要と考えられる。

本研究は、せん断破壊する有孔ばりを対象にコンタクトゲージ等による網目状の測定を行い、測定データを一般最小二乗法により整理して、2次元の変形状態を視覚的に示す。また、孔のないはりとの比較を行う。本報のデータ処理法は、今井ら<sup>(5)</sup>が鉄筋枠付き耐震壁の周辺枠の変形状態を求めるのに使用した手法と類似である。なお本研究の一部は拙論<sup>(6)</sup>で報告済みである。

## 2. 試験体

試験体は、開口の有無のみが異なるはり2体で、寸法・配筋を図1に示す。開口の直径は、はりの有効せい $d=366\text{mm}$ の0.3倍とした。開口のない方をBC-1試験体、開口のある方をBH-1試験体と呼ぶ。試験部分(全長3200mmのうち中央の1000mm)の筋筋比は $p_w=0.23\%$ 、引張鉄筋比は $p_t=2.08\%$ である。引張鉄筋のまわりで付着割裂破壊が生じないように、主筋の一部に内径62mmのスパイラルを巻いた。

使用材料の力学特性を表1、表2に示す。コンクリートの材令は、材料試験時が30日、BC-1、BH-1加力時で26日、32日であった。筋筋のD6には降伏棚が無かったので、0.2%残留重点から降伏強度を求めた。主筋のD25は、曲げ降伏が生じないように高強度のものを選んだ。

## 3. 加力・測定方法

200tアクチュエータで大野式逆対称加力し、50tロードセルで荷重を測定した。試験部分のたわみ量を図2のように測定し、変形制御で単調荷重した。試験部分の筋筋と危険断面引張側の主筋には歪ゲージを貼っておいた。試験部分の詳細な変形状態を知るため、筋筋位置に対応して図3(a)のような測定点のメッシュを設定し、読み取り精度1/1000mmのコンタクトゲージで破線の方向への相対変位を測定した。

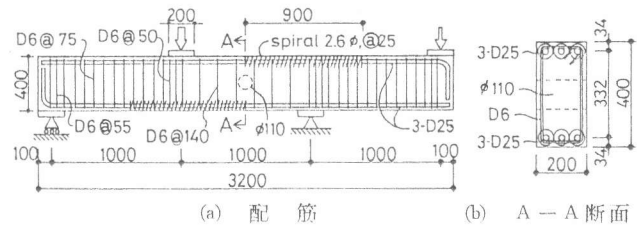


図1. 試験体の寸法および配筋(単位mm)

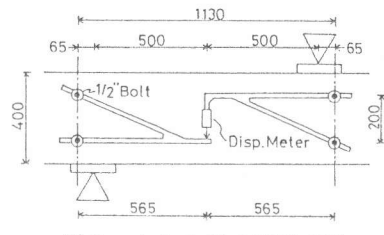
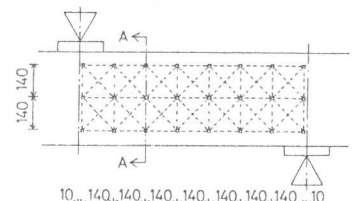
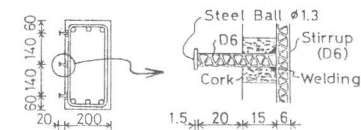


図2. たわみ量の測定方法



(a) 測定位置とその方向



(b) A-A断面 (c)測定点詳細

図3. コンタクトゲージの測定網

表1. コンクリートの力学特性

割線剛性(0.4Fc)	228 t/cm <sup>3</sup>
圧縮強度: Fc	264 kg/cm <sup>2</sup>
圧縮強度時歪度	1.8 ~ 2.2 × 10 <sup>-3</sup>
割裂引張強度	22.7 kg/cm <sup>2</sup>

表2. 鉄筋の力学特性

	D6	D25
降伏強度	3.60 t/cm <sup>2</sup>	5.36 t/cm <sup>2</sup>
引張強度	5.29 t/cm <sup>2</sup>	8.66 t/cm <sup>2</sup>

測定点(φ1.3鋼球)はD6筋を介して筋筋に固定した。測定点間のひびわれが拡大してコンタクトゲージの測定範囲±0.5mmを超えた箇所では、精度1/20mmのノギスによる測定に切りかえた。

#### 4. 実験結果の概要

BC-1, BH-1の試験部分のせん断力Qとたわみ量δの関係を図4に示す。図中の黒丸は、コンタクトゲージによる測定を行った荷重点を示す。このうち二重丸で囲った荷重点については第6章で具体的に变形状態を示す。Yield 6, 7などの書きこみは、No.6と7の歪ゲージが降伏歪度 $\epsilon_y$ を越えたことを示す。筋筋は降伏点不明瞭なので、応力歪関係の非線形性が著しくなる $2.0 \times 10^{-3}$ を $\epsilon_y$ と定義した。両試験体の最大耐力直後のひびわれ状況を図5に示す。

##### 4.1 BC-1 試験体

開口のないBC-1試験体では、アクチュエータ制御装置の故障のため、Q=12.5tの荷重が一気に加わり直ちに除荷するという事故があった。事故中に発生したひびわれを図5(a)に破線で示す。Q-δ関係は、事故後の残留変形点を始点として描いた。

最初の筋筋の降伏はQ=17.0tで検出し、Q=21.6tまでに中央部の4本の筋筋が降伏した。その後も耐力は上昇し、Q=24.8tからコンクリートの圧壊が始まった。最大耐力はQ<sub>max</sub>=27.7t、このとき危険断面での主筋の歪度は降伏歪度の60~70%であった。δ=18mmでは、図5(a)のひびわれに加えて、2つの加力点を直接斜めに結ぶ大きな斜めひびわれが発生した。δ=22mmとδ=42mmで筋筋が破断して耐力が著しく低下した。

##### 4.2 BH-1 試験体

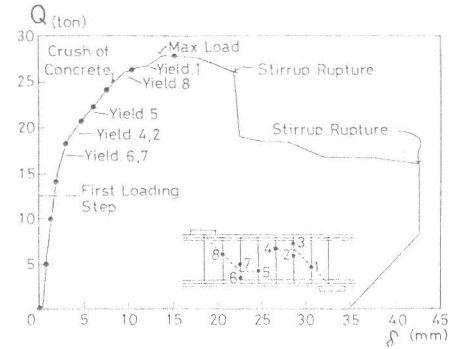
開口のあるBH-1試験体では、Q=9.0tで開口両横の筋筋に降伏を検出し、Q=12.0tまでに中央部の4本の筋筋はすべて降伏した。Q=12.5tから開口の近傍で斜めひびわれに沿うコンクリートの圧壊が始まった。最大耐力はQ<sub>max</sub>=16.1t、このとき危険断面での主筋の歪度は降伏歪度の30~35%であった。最大耐力以降は、BC-1と違って新たなひびわれはほとんど発生しなかった。δ=20mmとδ=25mmで筋筋が破断したが、これに伴う耐力低下はBC-1より緩やかであった。

#### 5. 上界定理による崩壊モードの算定、およびせん断耐力の計算

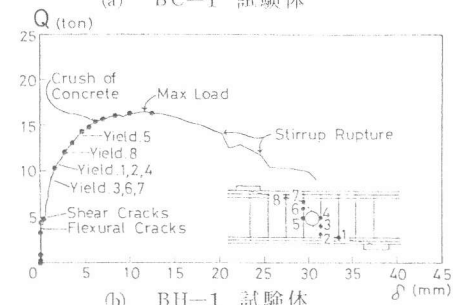
Nielsen他<sup>(5)</sup>が提案し土井<sup>(9)</sup>が拡張した上界定理によるせん断解析法を本試験体に適用する。鉄筋とコンクリートは完全剛塑性とし、コンクリートは図6のような降伏条件で流れ則に従うものとする。また加力板は変形しないものとする。このとき、崩壊時せん断力が最も小さくなるような崩壊モードは図7のように求まる。図5と比較すると、BC-1では、実際のひびわれが試験部分全域に広がっており、理論解との対応は悪い。BH-1ではひびわれ状況と理論解がほぼ一致した。上

界定理による両試験体の計算耐力は、各々Q<sub>u</sub>=36.6t=1.33Q<sub>max</sub>, Q<sub>u</sub>=25.0t=1.55Q<sub>max</sub>である。

BC-1についてその他の提案式を適用すると、荒川<sup>(10)</sup>式<sup>(2)</sup>ではQ<sub>u</sub>=14.0t(=0.51Q<sub>max</sub>)、荒川原式<sup>(2)</sup>ではQ<sub>u</sub>=17.8t(=0.65Q<sub>max</sub>)、称原・加藤<sup>(6)</sup>の下界定理ではQ<sub>u</sub>=24.6t(=0.89Q<sub>max</sub>)となる。BH-1については、有孔ばり委員会(松下・黒正<sup>(11)</sup>)式

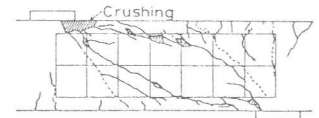


(a) BC-1 試験体



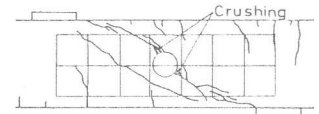
(b) BH-1 試験体

図4 荷重・変形関係



(a) BC-1 試験体

Q=27.44t δ=15.64mm



(b) BH-1 試験体

Q=15.97t δ=12.51mm

図5 最大耐力直後のひびわれ状況

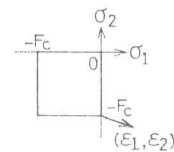
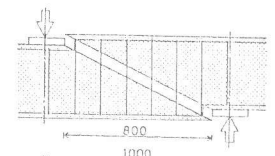
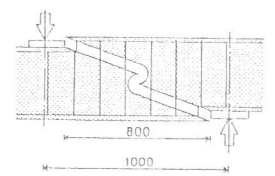


図6 コンクリートの降伏条件



(a) BC-1 試験体



(b) BH-1 試験体

図7 上界定理による崩壊モード

では  $Q_U = 11.5t (=0.71Q_{max})$ 、荒川 *mm* 式の修正式 (広沢・清水<sup>(7)</sup>) では  $Q_U = 19.5t (=1.21Q_{max})$  となる。

## 6. 各荷重段階での変形状態

### 6.1 一般最小二乗法によるデータ整理

コンタクトゲージやノギスによる相対変位測定データは、測定点と測定器の間ガタなどにより読み取り精度より大きな測定誤差を含む。相対変位の測定は図3(a)に示す65か所で行っている。この測定データを65元ベクトル  $X$  であらわす。一方、全測定点24個の変位の自由度  $k$  は、全体の剛体変位と剛体回転を差し引いて  $k=24 \times 3 - 3 = 45$  である。これを45元ベクトル  $\xi$  であらわす。測定誤差がゼロであるとすれば、 $X$  と  $\xi$  の間には  $X = A\xi$  ( $A$  は  $65 \times 45$  の適合条件行列) の関係がある。ここで誤差ベクトル  $W = X - A\xi$  を定義する。コンタクトゲージとノギスの測定誤差の比が読み取り精度の比  $1/50$  に等しいと仮定し、 $W$  の分散行列を  $\Sigma = \sigma^2 \Sigma_0$  ( $\sigma^2$  は未知母数、 $\Sigma$  と  $\Sigma_0$  は対角行列) と書くと、 $\Sigma_0$  の対角要素は、コンタクトゲージによる測定箇所  $1$ 、ノギスによる測定箇所  $50$  と定まる。一般最小二乗法<sup>(1)</sup> によれば、測定誤差を最大限に取り除いて測定点の真の変位  $\xi$  を推定するには  $A' \Sigma_0^{-1} A \xi = A' \Sigma_0^{-1} X$  ( $'$  は転置をあらわす) という連立一次方程式を解けばよい。

上記の方法で求めた両試験体の測定点変位を、3つの荷重ステップについてプロットして図8、図9に示す。

変形は40倍に拡大した。図中の黒丸と黒三角印は、それぞれ引張側と圧縮側で鉄筋の降伏歪度 (縦方向は  $2.0 \times 10^{-3}$ 、横方向は  $2.55 \times 10^{-3}$ ) を超えた要素を示す。測定精度の検討のため、測定値の母標準誤差<sup>(1)</sup> を求めたところ、コンタクトゲージで  $0.006 \sim 0.01mm$ 、ノギスで  $0.3 \sim 0.5mm$  程度の大きな値となった。しかし、図8、図9の左右端の上端・下端の測定点変位から両端の回転角  $\theta_A, \theta_B$  を求め、 $\delta' = (\theta_A + \theta_B) \cdot \ell / 2$  ( $\ell$ : 左右端の距離で  $980mm$ ) としてたわみ量を推定したところ、表3、表4のように実測値 (図2参照) とよく一致し、推定値  $\delta$  の信頼性が確認できた。

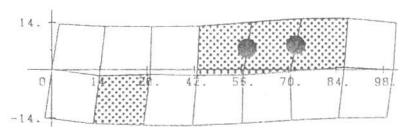
測定点に囲まれた正方形要素の内部で歪度が直線的に変化するものと仮定し、図8(c)と図9

表3 BC-1のたわみ量推定量(mm)

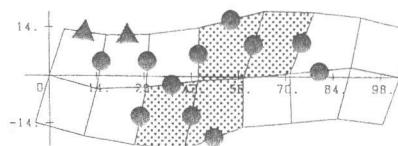
	図8(a)	図8(b)	図8(c)
実測値	3.09	7.59	15.64
推定値	3.10	7.42	15.68

表4 BH-1のたわみ量推定値(mm)

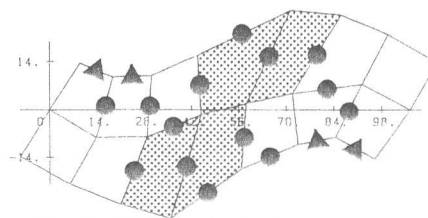
	図9(a)	図9(b)	図9(c)
実測値	1.54	5.45	12.51
推定値	1.52	5.38	12.30



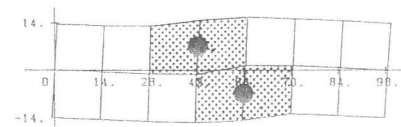
(a)  $Q=18.33t, \delta=3.09mm$   
(最初の鉄筋降伏検出の直後)



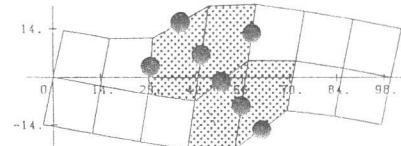
(b)  $Q=23.97t, \delta=7.59mm$



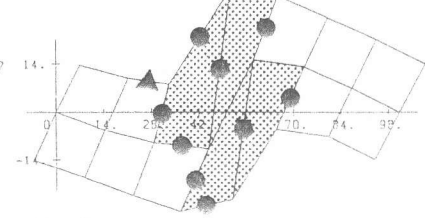
(c)  $Q=27.44t, \delta=15.64mm$   
(最大耐力直後)  
図8 BC-1の変形図



(a)  $Q=10.10t, \delta=1.54mm$   
(同左)



(b)  $Q=14.77t, \delta=5.45mm$



(c)  $Q=15.97t, \delta=12.51mm$   
(同左)  
図9 BH-1の変形図

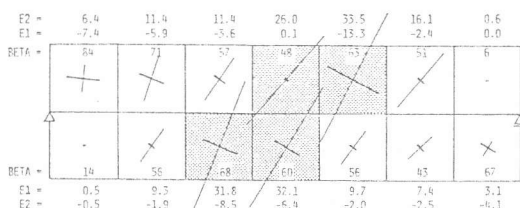


図10 BC-1の主応図 ( $Q=27.44t, \delta=15.64mm$ )

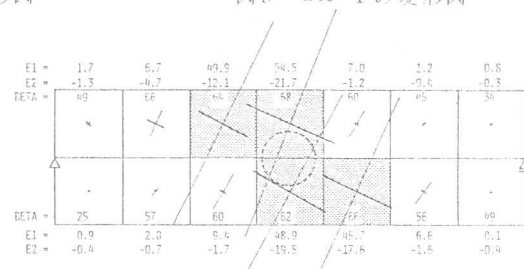


図11 BH-1の主応図 ( $Q=15.97t, \delta=12.51mm$ )

(c)における各要素中央での主歪の大きさと角度を求め、各々  $E_1$ 、 $E_2$  (単位  $10^{-3}$ )、 $BETA$  (単位 deg) として図 10、図 11 に示す。図 8～図 11 で、主歪の大きい要素の上位 4 つを  $\text{■}$  で示す。

## 6.2 BC-1 と BH-1 の変形状態の比較

- (1) BC-1 では小変形時と大変形時とで変形モードが異なる。小変形時 (図 8 (a)) では部材端寄りの要素で主歪が大きく、逆対称変形からのずれも目立つが、大変形時には中央部の主歪が大きくほぼ逆対称変形となる。BH-1 では、主歪の大きい要素が一貫して同じであり、逆対称変形からのずれも少ない。
- (2) 大変形時に主歪の大きい要素は BC-1 と BH-1 とで異なり、ちょうど裏返しの位置にある。
- (3) 図 4 によれば最大耐力時のたわみ量は BC-1 の方が BH-1 より 20% 大きいのが、BH-1 では中央 4 つの要素への変形集中が大きいため、最大変形要素の主歪は BH-1 の方が 60% 大きい。
- (4) BC-1 の材軸方向の歪度は局部的にも全体的にも BH-1 より大きい。材軸の局部的の折曲りは BH-1 が著しい。
- (5) BC-1 ではひびわれ法線方向と主歪の方向が一致しないが、BH-1 ではほぼ一致する。
- (6) 図 5 (a) と図 8 (c) を比べると、BC-1 では  $45^\circ$  方向の斜めひびわれまわりの回転による変形が大きく、上界定理の解とは降伏線の位置だけでなく運動の方向も異なると言える。一方、BH-1 では開口から伸びる単一のひびわれが上下方向に平行に開くことによって変形が生じており、上界定理との適合性は BC-1 よりも良い。

## 7. 主成分分析法による変形モードの分析

前節で推定した、各荷重点における測定点変位の集合を、荷重ステップの進展とともに変化するベクトル変量とみなす。主成分分析法<sup>(6)</sup>によって、このベクトル変量の変動を最も特徴づける成分を求める。両試験体の第 1・第 2 主成分の固有ベクトルを図 12 と図 13 に示す。両試験体とも、第 1 主成分はほぼ完全な逆対称変形となり、第 2 主成分は純曲げに似た変形となった。

BC-1 と BH-1 の第 1 主成分の寄与率はそれぞれ 96.8% と 98.7%、第 2 主成分の寄与率は 2.2% と 1.0% であった。BC-1 の第 2 主成分がやや大きいのは、図 8 (a)～(c) で見たような変形モードの変化に帰因する。しかし両試験体とも基本的には第 1 主成分の寄与率が圧倒的であり、最大耐力までの変形モードは第 1 主成分のみによって代表しうると言える。

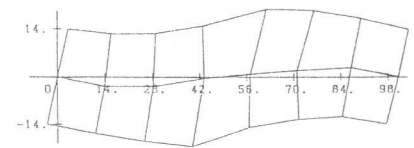
## 8. 結論

- (1) 本報で示した測定方法と一般最小二乗法によるデータ整理によって、試験体の変形状態を詳細かつ正確に知ることができた。
- (2) 開口のある試験体では、開口のない試験体に比べて最大耐力時のたわみ量は小さかったが、変形が単一のひびわれに集中したため、局部的な変形は逆に大きかった。
- (3) 上界定理の解との適合性は、開口のある試験体の方がよかった。

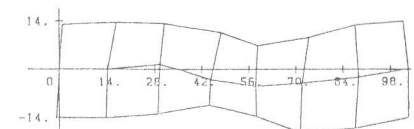
謝辞 本研究のすべての段階において、東京大学教授・青山博之博士と同助教授・小谷俊介博士の全面的な御指導を賜った。また、実験の準備と実施にあたっては、東京大学助手細川洋治氏はじめ青山研究室諸氏の御指導・御助力を賜った。厚く御礼申し上げます。

参考文献 (日本建築学会論文報告集を「論報」、同大会梗概集を「大会」と略す。)

- (1) 例えば本間・春日「次元解析・最小二乗法と実験式」コロナ社、1957年1月、
- (2) 荒川：論報 66、1960年11月、pp. 437-440
- (3) 松下・黒正：論報 69、pp. 541-544、1961年10月
- (4) 例えば河口「多変量解析入門」森北出版、1973年6月
- (5) Nielsen et al. : IABSE Proceedings, P-15/78, May 1978
- (6) 称原・加藤：大会、1978年9月、pp. 1731-1732
- (7) 広沢・清水：建築技術、1979年3月、pp. 13-21
- (8) 今井・小杉：論報 278、1979年4月、pp. 81-90
- (9) 土井：大会、1980年9月、pp. 1701-1702
- (10) 市之瀬ほか：日本建築学会東海支部研、1983年2月、pp. 161-168



(a) 第 1 主成分

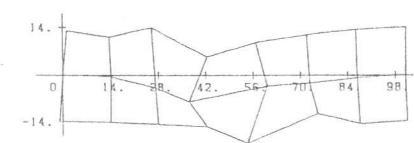


(b) 第 2 主成分

図 12 BC-1 の固有ベクトル



(a) 第 1 主成分



(b) 第 2 主成分

図 13 BH-1 の固有ベクトル