

# 論文 せん断補強筋に沿う人工ひび割れを有する RC スレンダービームに対するせん断耐荷機構の耐力予測モデルの適用性

山田 雄太\*1

**要旨:** 既設構造部材における合理的なせん断耐力予測手法の開発を目的として、せん断補強筋に沿う人工ひび割れを有する RC はり部材を対象とした耐荷機構の耐力予測モデルを提案した。提案したモデルは人工ひび割れの位置に応じて定まる斜めひび割れの経路により分かたれた自由体に基づきビーム機構およびアーチ機構の耐力を導くものである。せん断補強筋および人工ひび割れの有無を実験変数とした $a/d = 3.0$ の RC スレンダービームに対してモデルを適用した結果、せん断補強筋が分担する鉛直方向分力をアーチ機構に分類することにより各耐荷機構の耐力および終局時のせん断耐力を良好な精度で予測し得ることを明らかにした。

**キーワード:** RC はり, せん断, 耐荷機構, アーチ機構, ビーム機構, 人工ひび割れ, 鉄筋腐食

## 1. 序論

既設鉄筋コンクリート (RC) 構造部材における合理的なせん断耐力予測手法の開発を目的として、RC はり部材におけるせん断耐荷機構の耐力予測モデルが提案されている<sup>1) 2)</sup>。このモデルは各耐荷機構の定義から導かれる自由体に基づき、作用せん断力におけるビーム機構分担分の最大値 (ビーム機構の耐力) とアーチ機構分担分の最大値 (アーチ機構の耐力) の予測を可能とするものである。このモデルの適用により、せん断耐力予測手法の理論化と同時に、部材の状態に応じた耐力予測手法の構築が期待できる。

ビーム機構の耐力予測モデルについては、せん断スパン比 ( $a/d$ ) が 1.0~3.0 の健全なはりを対象とした種々の実験および解析の結果に対してその適用性が明らかにされており<sup>1) 2)</sup>、変形の適合条件をエネルギー定理により与えた場合においては、 $a/d = 3.0$  のスレンダービームに対する適用性が高いことが確認されている<sup>3)</sup>。さらに、既設構造部材に対してもモデルの適用範囲を拡張する観点から、FRP シートによりせん断補強された部材に対するモデル<sup>4)</sup>や人工ひび割れを有する部材に対するモデル<sup>5)</sup>が提案されている。引張主鉄筋に沿うひび割れを有する場合には、既存のひび割れ面上に伝達される応力がビーム機構の耐力に支配的な影響を及ぼすが<sup>5)</sup>、せん断補強筋に沿うひび割れを有する場合には、载荷により生じるひび割れが健全な箇所に進展することから<sup>6)</sup>、このような部材を対象とすることで、劣化した部材に対するエネルギー定理に基づく適合条件の適用性を確認することができる。

一方、アーチ機構の耐力予測モデルについては、FRP シートによりせん断補強された $a/d = 2.0$  のショートビームに対する適用性が示唆されているものの<sup>4)</sup>、経年劣化した部材への適用性やせん断補強材の影響に関する耐

荷機構上の分類については明らかにされていない。経年劣化によりひび割れを生じた部材に対する耐力予測手法を構築するためには、せん断補強材に関する耐荷機構上の分類を明らかにした上で、既存のひび割れを有する部材におけるアーチ機構の耐力予測モデルを構築するとともに、終局せん断耐力の予測手法を構築する必要がある。

本研究では、劣化により生じたひび割れ面上の応力伝達とひび割れの形状に起因する影響を無視し得る状態においてモデルの適用性を確認する観点から、せん断補強筋に沿う人工ひび割れを有する RC はり部材を対象としたアーチ機構とビーム機構の耐力予測モデルおよび終局せん断耐力の予測手法を提案するとともに、既往の研究において実験が行われた $a/d = 3.0$  の RC スレンダービームに対する適用性を確認した。

## 2. 耐荷機構の耐力予測モデル

### 2.1 アーチ機構とビーム機構の定義

アーチ機構およびビーム機構のせん断力寄与分は、断面に作用するモーメントの 1 階微分に微分連鎖則を適用することで導くことができる<sup>7)</sup>。すなわち、

$$V_{a(x)} = T_{(x)} \frac{dy_{(x)}}{dx} \quad (1)$$

$$V_{b(x)} = y_{(x)} \frac{dT_{(x)}}{dx} \quad (2)$$

ここに、 $V_a$ : アーチ機構の荷重寄与分、 $V_b$ : ビーム機構の荷重寄与分、 $T$ : 主鉄筋に作用する軸方向引張力、 $y$ : 応力中心間距離、 $x$ : 部材軸方向座標である。

式(1)および式(2)は、**図一1**に示す微小要素に作用する力の平衡状態からも導出することが可能であり、平面保持の仮定が適用できない場合においても成立する。この平衡状態からも、アーチ機構は圧縮合力作用位置の変化に起因する耐荷機構であり、ビーム機構は軸方向合力の

\*1 日本大学 理工学部土木工学科 助教 博士(工学) (正会員)

変化に起因する耐荷機構であることが確認できる。

## 2.2 耐荷機構の耐力到達時における部材の状態

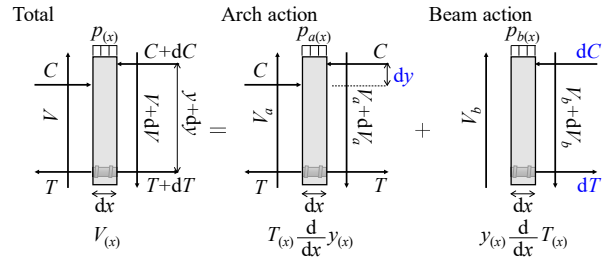
はり部材では、水平（部材軸）方向に対し加力点から有効高さの半分程度以内の距離に鉛直（圧縮）応力卓越領域（D領域）が形成され、以遠には鉛直応力非卓越領域（B領域）が形成される<sup>1)</sup>。作用荷重の増加に伴い、B領域における中立軸位置から斜めひび割れが発生する。D領域では作用せん断応力が低減するため<sup>1)</sup>、B領域全域にひび割れが進展した後、その進展は抑制される。一連の進展過程において、ひび割れの開口後に滑動を開始することで、斜めひび割れ面上にはコンクリートの軟化挙動により最大主（引張）応力に加えてせん断応力が作用する。この状態において、 $V_b$ はビーム機構の耐力( $V_{bf}$ )に到達すると考えられる<sup>1)</sup>。せん断補強材のないスレンダービームでは、 $V_b = V_{bf}$ の状態において、荷重に対する抵抗力を失うが、ショートビームおよびディープビームでは、 $V_b = V_{bf}$ の状態以降も $V_a$ の発現により荷重に対する抵抗力を維持し、 $V_a$ がアーチ機構の耐力( $V_{af}$ )に到達すると同時に部材は終局を迎える<sup>1)</sup>。せん断補強材を有する部材では、 $V_b = V_{bf}$ の状態以降も $V_b$ が概ね一定の値に保たれることで終局耐力の増加に寄与する<sup>8)</sup>。

鉄筋比が十分小さい場合、鉄筋によるダウエル効果および付着応力による斜めひび割れの開口抑制効果が $V_{bf}$ に及ぼす影響は小さいことに加え<sup>2)</sup>、 $V_b = V_{bf}$ の状態における斜めひび割れの開口幅は十分小さいことから、せん断補強筋のダウエル効果および開口抑制効果が $V_{bf}$ に及ぼす影響は本質的には無視できるものと考えられる<sup>8)</sup>。一方、斜めひび割れが十分開口した $V_a = V_{af}$ の状態では、鉄筋に生じる付着応力は無視できる程小さく<sup>1)</sup>、その反作用として斜めひび割れ面上に伝達される応力も同程度に小さいことから、せん断補強材を有する部材において $V_b$ が一定の値に保たれるためには、ビーム機構の形成に必要な軸方向合力の変化がせん断補強材のダウエル効果等に起因して生じる必要がある。このことから本研究では、 $V_b = V_{bf}$ の状態におけるせん断補強筋の影響を無視し、そのダウエル力を $V_a = V_{af}$ の状態におけるビーム機構に分類することとした。せん断補強筋に作用する力の鉛直（軸）方向分力については、いずれの耐荷機構に分類した場合でも矛盾を生じないが、後述する実験と耐力算定の結果からアーチ機構に分類することとした。

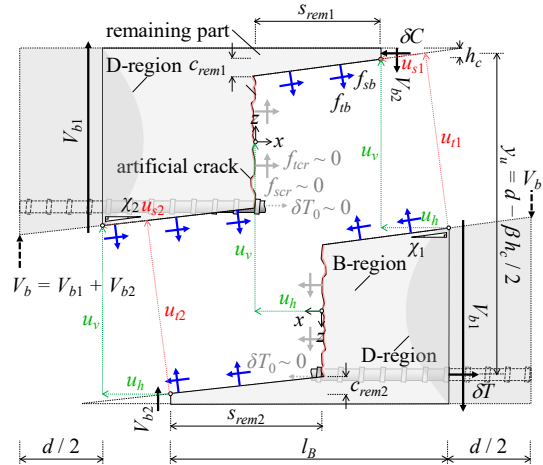
## 2.3 ビーム機構の耐力予測モデル

### (1) 力の釣合式

$V_b = V_{bf}$ の状態におけるビーム機構の自由体を図一2に示す。せん断補強筋に沿う平滑な人工ひび割れを有する部材では、人工ひび割れの先端から荷重点および支点を結ぶ直線状に斜めひび割れを生じることから、このひび割れ経路をモデルに反映した。平滑な人工ひび割れ面



図一1 せん断耐荷機構の概念図



図一2 ビーム機構の自由体

上に作用するせん断応力( $f_{scr}$ )および引張応力( $f_{tcr}$ )は無視できる程小さいことを仮定した。B領域端部から人工ひび割れ導入位置にかけて引張主鉄筋がコンクリートに覆われている場合には、この区間においても主鉄筋に作用する引張合力の変化分( $\delta T_0$ )を生じるが、実際には引張主鉄筋に沿うひび割れの発生により付着力は消失することから、健全な部材と同様に $\delta T_0 = 0$ であることを仮定した。アーチ機構の耐力予測モデルとの整合を図る観点から、応力中心間距離の導出については等価応力ブロックの適用が可能であることを仮定した。対象とするビーム機構の自由体から $V_{bf}$ に関する以下の式を得る。

$$V_{bf} = \frac{by_u}{l_B} \left( f_{sb} \sum_i s_{remi} + f_{tb} \sum_i c_{remi} \right) \quad (3)$$

$$y_u = d - \frac{1}{2} \beta h_c \quad (4)$$

$$l_B = a - d \quad (5)$$

ここに、 $b$ : はり幅、 $y_u$ : B領域端部の荷重点側における応力中心間距離、 $l_B$ : B領域の部材軸方向長、 $f_{sb}$ :  $V_b = V_{bf}$ の状態において斜めひび割れ経路上に伝達されるせん断応力、 $f_{tb}$ :  $V_b = V_{bf}$ の状態において斜めひび割れ経路上に伝達される引張応力、 $s_{remi}$ :  $i$ 番目の健全部における斜めひび割れ進展距離の鉛直方向投影長、 $c_{remi}$ :  $i$ 番目の健全部における斜めひび割れ進展距離の水平方向投影長、 $i = 1 \sim 2$ 、 $\beta$ : 等価応力ブロックにおける応力分布高さの低減係数(0.80)<sup>9)</sup>、 $h_c$ : B領域端部の荷重点側における斜めひび割れ発生位置からはり上縁までの距離である。

## (2) 材料構成則

図-3 に斜めひび割れ面に作用する引張応力 ( $\sigma_t$ ) およびせん断応力 ( $\sigma_s$ ) の概形, ビーム機構の自由体に作用する内力が成す仕事 (内力仕事) とひび割れ面の形成過程で蓄積する表面エネルギーの定義を示す。既往の研究<sup>3)</sup>と同様に, せん断強度の低減係数 ( $R_s$ ) については, 斜めひび割れの法線方向開口変位 ( $u_t$ ) および骨材最大寸法の関数として与えた。引張強度の低減係数 ( $R_t$ ) については, 土木学会コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に記されている引張軟化曲線と整合するよう  $u_t$  に対する連続関数として与えた<sup>3)</sup>。

## (3) 変形の適合条件

部材軸と直交する座標系における変位場と斜めひび割れ面と直交する座標系における変位場には以下の関係が成立する。

$$\begin{pmatrix} u_{ti}(u_v, u_h) \\ u_{si}(u_v, u_h) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \chi_i & \sin \chi_i \\ -\sin \chi_i & \cos \chi_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_v \\ u_h \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\tan \chi_i = \frac{c_{remi}}{s_{remi}} \quad (7)$$

ここに,  $u_{ti}$ :  $i$  番目の健全部における斜めひび割れ面の法線方向開口変位,  $u_{si}$ :  $i$  番目の健全部における斜めひび割れ面の接線方向開口変位,  $u_v$ : 斜めひび割れ面の鉛直方向開口変位,  $u_h$ : 斜めひび割れ面の水平方向開口変位,  $\chi_i$ :  $i$  番目の健全部において斜めひび割れ面と水平面とが成す角度,  $i = 1 \sim 2$  である。

内力仕事は以下の式で与えられる<sup>3)</sup>。

$$W = W_v + W_h = \int_0^u \begin{pmatrix} \delta V_{b(u_v, u_h)} \\ \delta C(u_v, u_h) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} du_v \\ du_h \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここに,  $W$ : 自由体に生じる内力仕事,  $W_v$ :  $\delta V_b$  による内力仕事,  $W_h$ :  $\delta C$  による内力仕事,  $\delta V_{b(u_v, u_h)}$ : 斜めひび割れで分かれた自由体に作用するせん断力の変化量,  $\delta C(u_v, u_h)$ : B 領域内における軸方向圧縮合力の変化量,  $u = u_v$  for  $u_v$ ,  $u = u_h$  for  $u_h$  である。

表面エネルギーは以下の式で与えられる<sup>3)</sup>。

$$G = G_t + G_s \\ = \sum_i \int_{A_i} \int_0^u \begin{pmatrix} \sigma_{t(u_{ti})} \\ \sigma_{s(u_{ti})} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} du_{ti} \\ du_{si} \end{pmatrix} dA_i \quad (9)$$

ここに,  $G$ : 斜めひび割れ面の形成過程において蓄積する全表面エネルギー,  $G_t$ :  $\sigma_t$  による表面エネルギー,  $G_s$ :  $\sigma_s$  による表面エネルギー,  $A_i$ :  $i$  番目の健全部におけるひび割れの進展面積,  $u = u_{ti}$  for  $u_{ti}$ ,  $u = u_{si}$  for  $u_{si}$ ,  $i = 1 \sim 2$  である。

ここで対象としているモード I (法線方向開口変形モード) とモード II (面内せん断変形モード) の混合モードによる変位場において, エネルギー保存則を満足する経

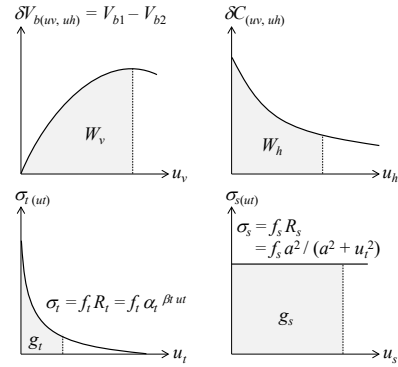


図-3 材料構成則の概念図

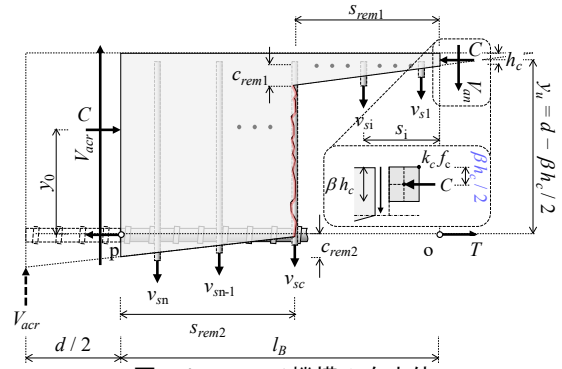


図-4 アーチ機構の自由体

路上に可容な変形状態が存在する。可容な状態において  $G_t$  もしくは  $G_s$  に最大値が存在する場合, その値が混合モードにおける材料固有の破壊特性値に相当し, 最大値を示す時の変形状態がビーム機構の崩壊と対応することが予想される。2.2 に示したように, ひび割れの開口から面内せん断変形を生じる過程において, モード II 開口変形が支配的であることを仮定し, 解析領域内の弾性変形を無視すれば, 変位場における  $W - G = 0$  の経路上で  $G_s$  が局所最大化する時,  $V_b = V_{bf}$  の状態に至ることになる<sup>3)</sup>。従って, ビーム機構の崩壊条件は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \text{Maximize} && G_{s(u_v, u_h)} \\ & \text{subject to} && W_{(u_v, u_h)} - G_{(u_v, u_h)} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

本研究では, 式(6)および式(10)から得られる最小の  $u_t$  をビーム機構崩壊時の  $u_t$  ( $u_{tf}$ ) として  $V_{bf}$  を算定した。

## 2.4 アーチ機構の耐力予測モデル

$V_a = V_{af}$  の状態において, 斜めひび割れの経路上に存在する全てのせん断補強筋の寄与を仮定すると, 図-4 に示すアーチ機構の自由体を得る。この自由体における o 点廻りのモーメントの釣合より次式を得る。

$$V_a l_B + C(y_0 - y_u) - \sum v_{si} s_i = 0 \quad (11)$$

ここに,  $C$ : 部材軸方向圧縮合力,  $y_0$ : B 領域端部の支点側における応力中心間距離,  $v_{si}$ :  $i$  番目のせん断補強筋に作用する鉛直方向分力,  $s_i$ :  $v_{si}$  作用軸から o 点までの距離である。

p 点廻りの外力モーメントと内力モーメントの釣合より,  $y_0$  は次式で与えられる。

$$y_0 = \frac{V_a d}{2C} \quad (12)$$

終局時における部材軸方向圧縮合力は等価応力ブロックを適用することで以下の式で与えられる。

$$C_f = k_c \beta \nu f_c b h_c \quad (13)$$

ここに、 $C_f$ ：終局時における部材軸方向圧縮合力、 $k_c$ ：等価応力ブロックにおける強度の低減係数 (0.85)<sup>9)</sup>、 $\nu$ ：圧縮強度試験により得られた強度と部材中の強度との差異を考慮した低減係数 (0.85)<sup>9)</sup>、 $f_c$ ：コンクリートの圧縮強度である。

式(4)および式(11)～式(13)を連立することにより、 $V_{af}$ に関する以下の式を得る。

$$V_{af} = V_{afc} + V_{afs} \quad (14)$$

$$V_{afc} = \frac{(d - \beta h_c / 2) k_c \beta \nu f_c b h_c}{l_B + d / 2} \quad (15)$$

$$V_{afs} = \frac{\sum v_{si} s_i}{l_B + d / 2} \quad (16)$$

ここに、 $V_{afc}$ ：コンクリートの $V_{af}$ 寄与分、 $V_{afs}$ ：せん断補強筋の $V_{af}$ 寄与分である。

斜め引張破壊を呈するスレンダービームでは、せん断補強筋の降伏後に終局に至る。 $v_{si}$ がせん断補強筋降伏時に作用する鉛直方向分力 ( $v_{sy}$ ) と等しく、せん断補強筋の配筋間隔 ( $s$ ) が一定の場合、 $V_{afs}$ は以下の式で表すことができる。

$$V_{afs} = \frac{n(n+1)v_{sy}s/2}{l_B + d/2} \quad (17)$$

ここに、 $n$ ：B領域内におけるせん断補強間隔数である。 $n = l_B/s$ の場合、 $V_{afs}$ は以下の式で表すことができる。

$$V_{afs} = \frac{v_{sy} l_B (l_B + s) / s}{2l_B + d} \quad (18)$$

## 2.5 終局耐力の予測手法

支点位置を  $x = 0$  とすれば、任意の断面における外力モーメントと内力モーメントの釣合より、作用せん断力 ( $V$ ) は次式で与えられる。

$$V = \frac{T_y}{x} \quad (19)$$

アーチ機構の荷重寄与率を次式で定義する。

$$V_a = P_a V \quad (20)$$

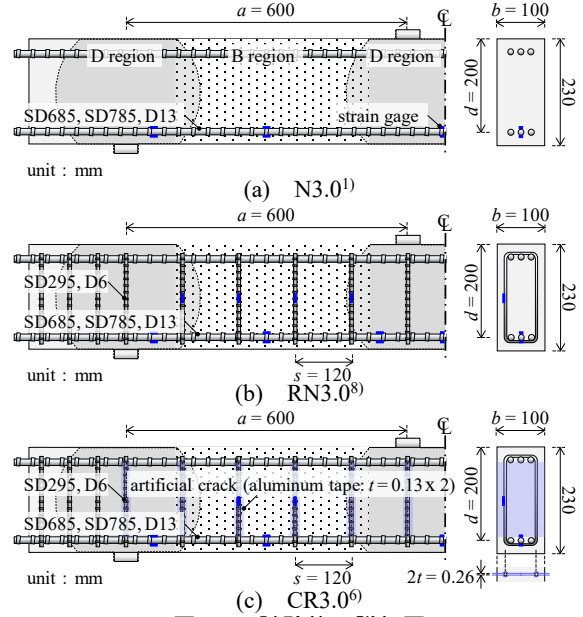
ここに、 $P_a$ ：アーチ機構の荷重寄与率である。

式(1)、式(19)、式(20)を連立することで、以下の微分方程式を得る<sup>8)</sup>。

$$\frac{dy(x)}{dx} - \frac{P_a}{x} y(x) = 0 \quad (21)$$

式(21)を  $y(d/2) = y_0$ 、 $y(l_B + d/2) = y_u$  のもとで解くことにより、次式を得る。

$$V_f = V_{af} \log\left(\frac{y_0}{y_u}\right) \frac{d}{2l_B + d} \quad (22)$$

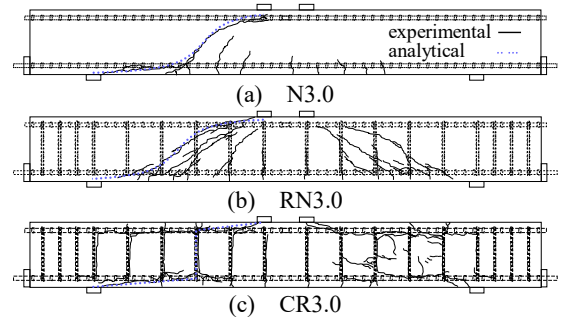


図一五 試験体の詳細図

表一 試験体の諸元

Name	$f_c$	$f_{wy}$	$2V_{fexp}$	$2V_{afexp}$	$2V_{afsexp}$	$2V_{bfexp}$	$u_f$
N3.0	24.6		44.9	7.9	-	44.9	1.71
RN3.0	34.0	337	155.8	104.2	110.4	67.0	8.98
CR3.0	28.8		104.1	86.6	*104.1	**18.7	49.5

$f_c$ ：コンクリートの圧縮強度 (MPa)、 $f_{wy}$ ：せん断補強筋の降伏強度 (MPa)、 $V_{fexp}$ ： $V_f$ の実験値 (kN)、 $V_{afexp}$ ： $V_{af}$ の実験値 (kN)、 $V_{afsexp}$ ： $V_{af}$ の実験値 (kN)、 $V_{bfexp}$ ： $V_{bf}$ の実験値 (kN)、\* $V_{af}$ =110.4kN> $V_f$ であるため $V_f$ を表示、\*\* $V_{bfexp}$ の第1ピーク値、 $u_f$ ：終局時のスパン中央変位 (mm)



図一六 実験終了時におけるひび割れ分布図およびモデルにより推定されたひび割れ経路

ここに、 $V_f$ ：終局せん断力である。

アーチ機構の耐力予測モデルにより算定された $y_0$ 、 $y_u$ 、 $V_{af}$ を式(22)に代入することで $V_f$ を得ることができる。

## 3. 耐力予測モデルにおける適用性の確認

### 3.1 実験概要

図一五に示す $a/d = 3.0$ のRCはり試験体<sup>1)</sup>、<sup>6)</sup>、<sup>8)</sup>を対象として、提案する耐力予測モデルおよび終局耐力の予測手法の適用性を確認した。せん断補強筋および人工ひび割れが $V_f$ 、 $V_{af}$ 、 $V_{bf}$ 、 $V_{afs}$ に及ぼす影響を明らかにするため、せん断補強筋の無い N3.0<sup>1)</sup>、せん断補強筋を有する RN3.0<sup>8)</sup>、せん断補強筋に沿う平滑な人工ひび割れ面を有する CR3.0<sup>6)</sup>を対象とした。CR3.0では、せん断補強筋の

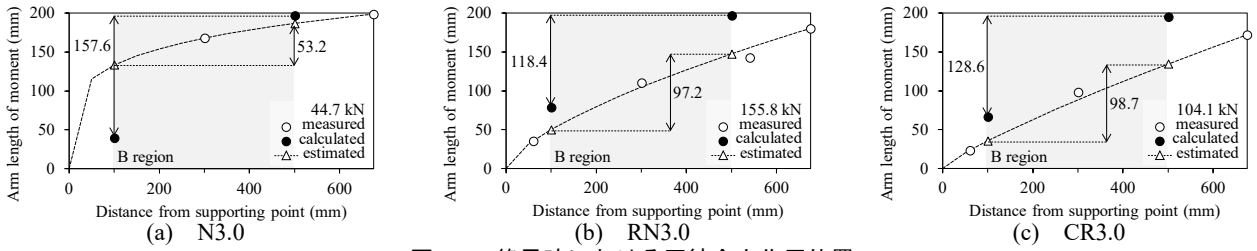


図-7 終局時における圧縮合力作用位置

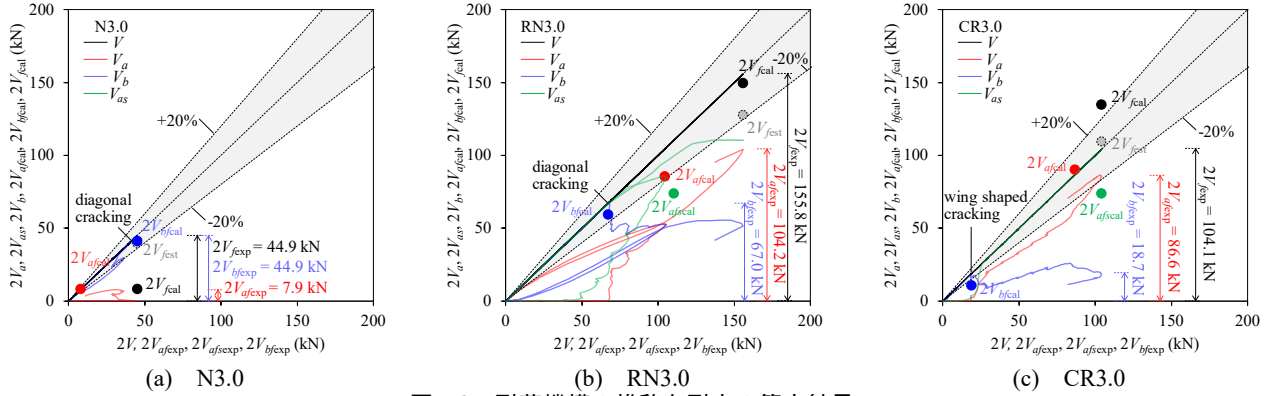


図-8 耐力機構の推移と耐力の算定結果

中心に人工ひび割れ面が位置するよう、厚さが 0.13 mm のアルミテープをせん断補強筋の両面から貼り合わせることではりの側面方向に貫通する平滑面を導入した。

表-1 に試験体の諸元を示す。表には、微分法<sup>2), 8)</sup>に基づき算出された $V_{af}$ および $V_{bf}$ の値も併記している。せん断破壊が確実に先行するよう、引張主鉄筋には高強度鉄筋を用いた。はり軸方向幅が 50 mm の載荷板および支圧板を用いることで 4 点曲げ静的載荷実験を行った。

### 3.2 実験結果

図-6 に実験終了時に観測したひび割れ分布図を示す。N3.0 では、約 40 kN の荷重作用時において斜めひび割れを観測した後、ひび割れの進展を伴い 44.9 kN の荷重作用時において荷重が急速に低下する典型的な斜め引張破壊を呈した<sup>7)</sup>。RN3.0 では、約 70 kN の荷重作用時において斜めひび割れを観測した後、荷重の増加とともに斜めひび割れの開口を伴い、せん断補強筋の寄与により 155.8 kN の荷重作用時において終局を迎える典型的な斜め引張破壊を呈した<sup>8)</sup>。CR3.0 では、約 20 kN の荷重作用時においてせん断スパン内における人工ひび割れの先端からウィングクラック様のひび割れを観測した後、ひび割れの開口を伴い、104.1 kN の荷重作用時において延性的に終局を迎えた。

図-7 に終局荷重作用時における圧縮合力作用位置 ( $y_{(x)}$ ) を示す。 $y_{(x)}$  の計測値 (measured) は、実験により計測した引張主鉄筋のひずみとその諸元から算定した  $T$  および  $V$  を式(19)に代入することで得たものである。 $y_{(x)}$  の推定値 (estimated) は、得られた 2 点の計測値を用いて微分法<sup>2), 8)</sup>により推定した値である。N3.0 では、B 領

域内において相対的にはりの上縁に近い位置に  $y_{(x)}$  が存在することに加え、その変化量も小さいことから、終局時にビーム機構が卓越したことが推定できる。RN3.0 および CR3.0 では、N3.0 と比較してはりの下縁に近い位置に  $y_{(x)}$  が存在することに加え、その変化量も大きいことから、終局時にアーチ機構が卓越したことが推定できる。

図-8 に  $2V$  に対する  $2V_a$ ,  $2V_b$ , せん断補強筋の荷重寄与分 ( $2V_{as}$ ) の推移を示す。 $V_a$  および  $V_b$  は、微分法<sup>2), 8)</sup>により得られた値である。 $V_{as}$  は、はり高方向の中央位置において計測されたせん断補強筋のひずみとその諸元を用いて算定した値であり、図中には、斜めひび割れを跨ぐ全てのせん断補強筋に作用する荷重の合計値を  $2V_{as}$  として示している。N3.0 では、終局に至るまでビーム機構が卓越し、その後、アーチ機構が発現したものの、 $V_{af}$  の値は  $V_f$  の 18% 程度に留まるものであった。RN3.0 および CR3.0 では、 $V_b = V_{bf}$  の状態以降、せん断補強筋の存在により  $V_b$  が概ね一定の値に保持されるとともに、アーチ機構が卓越することで  $V_{af}$  の値はそれぞれ  $V_f$  の 67% と 83% 程度の値を示した。 $V_{afc}$  については、その断面諸元が等しい N3.0 における  $V_{af}$  と同程度のものである可能性が高いことから、このアーチ機構の卓越はせん断補強筋の存

表-2 耐力予測モデルによる算定値

Name	$2V_{fcal}$	$2V_{fest}$	$2V_{afcal}$	$2V_{afccal}$	$2V_{afscal}$	$2V_{bfcal}$
N3.0	8.3	39.7	8.3	8.3	-	41.3
RN3.0	149.6	127.7	85.4	11.4	74.0	59.3
CR3.0	134.7	109.4	90.2	16.2	74.0	10.6

$V_{fcal}$ : 式(22)による  $V_f$  の算定値 (kN),  $V_{fest}$ : 実験結果から得られた  $y_0$  および  $y_u$  による  $V_f$  の推定値 (kN),  $V_{afcal}$ : 式(14)による  $V_{af}$  の算定値 (kN),  $V_{afccal}$ : 式(15)による  $V_{afc}$  の算定値 (kN),  $V_{afscal}$ : 式(18)による  $V_{afs}$  の算定値 (kN),  $V_{bfcal}$ : 式(3)による  $V_{bf}$  の算定値 (kN)

在に起因するものであることが推察できる。N3.0 および RN3.0 については、 $V_{bf}$  の値が概ね同程度であったのに対し、CR3.0 では、人工ひび割れの存在により健全な部材の 40%程度にまで減少することが確認された。

### 3.3 耐力予測モデルの適用性

耐荷機構の耐力予測モデルに適用したひび割れ経路を図一六に併記している。N3.0 および RN3.0 に対してはひび割れ経路関数  $r$  から、CR3.0 に対してはせん断スパン中央近傍における人工ひび割れの先端から加力点にかけて直線状の経路を選定することでそれぞれ推定した経路を示している。この経路は実験により観測された斜めひび割れの形状と概ね一致していることから、モデルに採用している自由体の形状については健全な部材と同様に概ね妥当であることが推定できる。一様な劣化状態ではない部材を対象とする場合には、劣化状態と载荷により生じるひび割れの形状を予測する手法が必要になる。

図一七には  $V_{af}$  予測モデルにより算定された  $y_0$  および  $y_u$  の値 (calculated) を併記している。RN3.0 および CR3.0 では、 $y_0$  および  $y_u$  の値は実験結果から推定された値を過大に評価したものの、B 領域両端部における合力間の距離には大きな差異を生じないことを確認した。一方、N3.0 では B 領域端部の支点側において  $y_0$  を過小評価する傾向を示した。

表一三に耐力予測モデルによる各耐力の算定値を示す。図一八にもこれらの算定値を併記している。いずれのケースにおいても、 $V_{af}$  および  $V_{bf}$  については概ね良好に予測可能であることが確認できる。この結果から、劣化した部材に対してもエネルギー定理に基づくひび割れ開口幅予測手法の適用性が高い可能性を示唆した。RN3.0 および CR3.0 では、 $V_{afs}$  の算定値はそれぞれ実験値の 58% と 68% 程度の値であり、過小評価する傾向を示したものの、 $V_{afs}$  と  $V_{afc}$  の和が  $V_{af}$  の実験値と概ね一致していることから、せん断補強筋の鉛直方向分力はアーチ機構に分類される可能性が高いことを示唆した。RN3.0 および CR3.0 では、提案した手法により  $V_{af}$  から  $V_f$  を概ね良好に予測可能であることが確認できるものの、N3.0 については過小評価する傾向を示した。実験結果から得られた B 領域端部における  $y_0$  および  $y_u$  を用いて推定した場合については、実験値と概ね一致することから、この過小評価の原因は  $y_0$  の算定精度に起因するものであると考えられる。以上の結果より、劣化した部材に対しても提案する耐力予測モデルの適用性が高い可能性を示した。 $V_{af}$  予測モデルにおける  $y_0$  および  $y_u$ 、 $V_{afs}$  の算定精度については実験結果に基づき検証を重ねていく必要がある。

## 4. 結論

本研究により得られた結論を以下に記す。

- 1) せん断補強筋に沿う人工ひび割れの位置に応じて定まるアーチ機構とビーム機構の自由体に基づき各耐荷機構の耐力を予測するモデルを提案するとともに、耐荷機構の定義に基づきアーチ機構の耐力予測モデルから終局耐力を予測する手法を導いた。
- 2) せん断補強筋および人工ひび割れの有無を実験変数としたせん断スパン比が 3.0 の RC はりにおける耐荷機構の推移とモデルによる耐力の算定結果から、せん断補強筋の鉛直方向分力をアーチ機構に分類することで、各耐荷機構の耐力および終局時のせん断耐力を良好な精度で予測し得ることを明らかにした。
- 3) アーチ機構の耐力予測モデルについてはせん断補強筋の無い部材に対する圧縮合力作用位置の算定精度に課題があるものの、B 領域両端部におけるその変化量を予測できれば、終局時におけるせん断耐力の予測値と実験値は概ね一致することを確認した。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (課題番号: JP20K14813) の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) 山田雄太: 斜めひび割れ経路上の応力伝達を考慮した RC はりのせん断抵抗機構におけるビーム機構の耐力予測式構築, 土木学会論文集 E2, Vol. 76, No.4, pp.386-402, 2020.12.
- 2) Yamada, Y.: Theoretical Evaluation Equation for Capacities of Beam Action in Shear Resistance Mechanisms of RC Beams Reflecting Dowel Action of Main Reinforcements, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, No.9, pp.1025-1039, 2021.9.
- 3) 山田雄太: 耐荷機構に立脚した RC はりの耐力予測モデルにおける斜めひび割れ開口幅の理論的予測手法, 土木学会論文集 E2, Vol.78, No.4, pp.264-273, 2022.11.
- 4) 山田雄太: FRP シートによりせん断補強された RC はり部材に対するせん断耐荷機構の耐力予測モデルの拡張, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.871-876, 2022.7.
- 5) 山田雄太: 部材軸方向に既存のひび割れを有するせん断補強筋の無い RC はりにおけるビーム機構の耐力予測モデルの提案, 土木学会第 76 回年次学術講演会講演概要集, V-261, 2021.9.
- 6) 山田雄太: せん断補強筋に沿う既存ひび割れを有する RC はりにおけるビーム機構の耐力予測モデルの提案, 令和 3 年度 (第 65 回) 日本大学理工学部学術講演会, H-17, 2021.12.
- 7) Park, R. and Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, New York, 1975.
- 8) 山田雄太: 穿孔の導入による応力場の意図的な変化が RC はりのせん断耐荷機構に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.595-600, 2018.7.
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編), 丸善出版, 2018.