

## § RC 部材のせん断破壊とせん断耐力算定法

### 1. はじめに

これまで、曲げモーメント、および曲げモーメントと軸力を受ける RC 棒部材と PC 棒部材の変形・破壊挙動について話を進めてきた。それらを計算に乗せるための数学理論として、はり理論（棒材の力学）が用いられた。対象とする現象が、はり理論により実用上満足できる範囲で精度よく表現できたからである。しかし、実際にはある条件の範囲内でそうであったに過ぎない。すなわち、部材の形状・寸法、配筋、荷重条件、材料の性質等の条件が前提を満足する範囲を逸脱すれば、それまで想定していなかった変形・破壊現象が生じ、従来の計算理論で現象が予測できない可能性がある。そのような例は多々考えられるが、ここで述べるせん断破壊はその代表例である。せん断破壊は脆性的であるため、実構造物の設計の観点からも重要な事項である。

### 2. RC 部材の曲げ破壊とせん断破壊

図 1 は、RC 部材の曲げ破壊とせん断破壊の関係を説明するための模式図である。中央に集中荷重を受ける RC はり部材において、形状（せん断スパン比  $a/d$ ）と主鉄筋比  $p$  の違いにより、観察される破壊プロセスがどのように異なるかを示している。はりには曲げモーメントとせん断力が作用することになる。

### 曲げモーメントとせん断力と受ける RC 棒部材の挙動

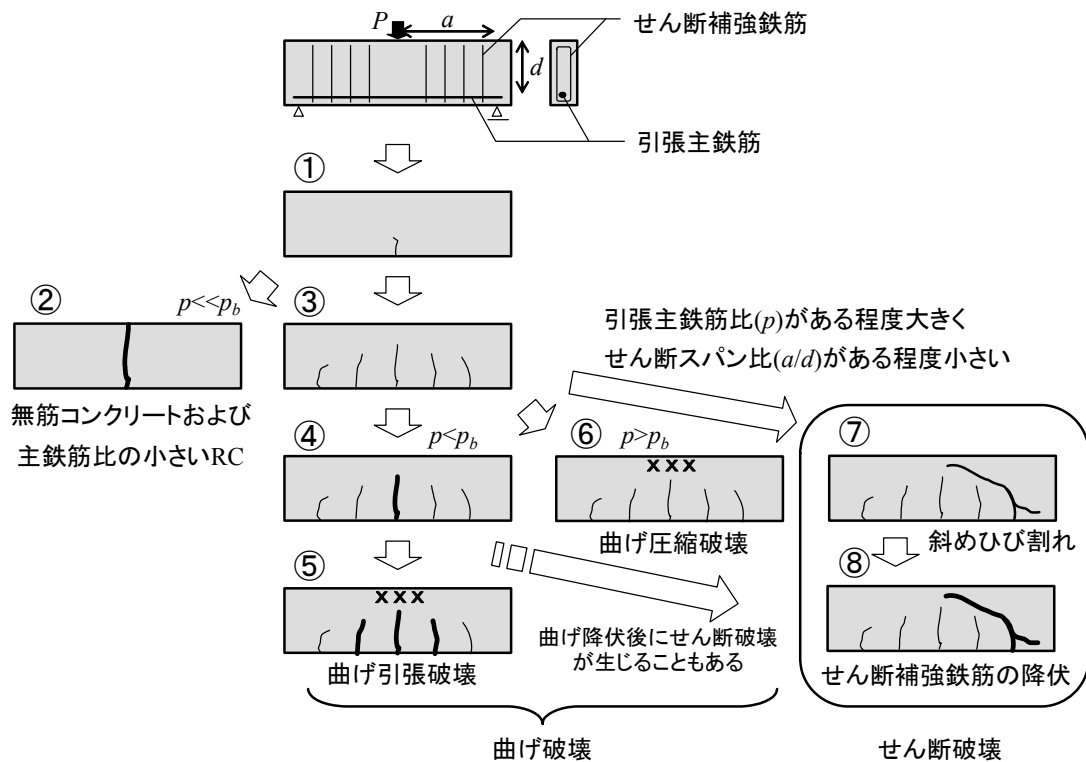


図 1 RC はり部材の曲げ破壊とせん断破壊

- ① 荷重をゼロから徐々に増加させてゆくと、曲げモーメントによる引張応力が最も大きいのは中央断面下縁に、最初に曲げひび割れが発生する。
- ② 無筋コンクリートの場合、このひび割れにより供試体は破断する。引張主鉄筋が配置されていても、極端に少量である場合は、曲げひび割れ発生後直ちに鉄筋が破断するので、無筋コンクリートと同様となる。
- ③ 曲げモーメントを受ける RC はり部材の挙動の章で説明したように、曲げひび割れ発生後、コンクリートがそれまで受け持っていた引張力を負担できるだけの引張主鉄筋が配置されているなら、部材はそれ以上の荷重に耐えることができる。引張主鉄筋とコンクリートとの付着により、荷重の増加にともないコンクリートの負担する引張力も大きくなり、引張応力がコンクリートの引張強度を越えた箇所に新たな曲げひび割れが発生する。結果的に、曲げひび割れはほぼ等間隔に複数本発生する。
- ④ 引張主鉄筋比が釣合い鉄筋比以下であれば、鉄筋が降伏し、
- ⑤ その後圧縮側コンクリートが圧縮破壊して、部材の終局状態となる。この破壊モードは曲げ引張破壊モードと呼ばれ、RC 部材の力学的な有利性を最も発揮できるので、通常の RC 部材は、想定される条件下でこの破壊モードをとるように、設計諸元が設定されている。
- ⑥ 引張主鉄筋が釣合い鉄筋比以上であれば、曲げひび割れ発生後、鉄筋が降伏することなく、圧縮側コンクリートの圧縮破壊によって終局となる。この破壊モードは曲げ圧縮破壊と呼ばれる。

曲げ引張破壊、曲げ圧縮破壊ともに、曲げ破壊である。曲げモーメントのみを受ける、あるいは曲げモーメントの影響が卓越する荷重条件下ではこのような破壊形態となる。

- ⑦ 一方、引張主鉄筋比が大きく、せん断スパン比 ( $a/d$ ) が小さければ、曲げひび割れが複数本生じた後、引張主鉄筋が降伏する前に、あるいは引張主鉄筋が降伏した後、圧縮側コンクリートが圧縮破壊する前にせん断スパンに斜めの大きなひび割れが発生することがある。この斜めひび割れはせん断ひび割れとも呼ばれる。斜めひび割れが発生した場合、このひび割れを跨ぐせん断補強鉄筋が適量以上配置されていなければ、直ちに部材はそれ以上の荷重に耐えられなくなり、終局となる。
- ⑧ せん断補強鉄筋が配置されている場合、斜めひび割れ発生後、せん断補強鉄筋が降伏した段階でそれ以上の荷重に耐えられなくなる。これが部材の終局となる。

斜めひび割れに起因した破壊モードは、曲げ破壊とは区別し、せん断破壊と呼ばれる。せん断破壊は、せん断力のみが作用する純せん断条件下でももちろん生じるが、本例のように、曲げモーメントとせん断力が作用する場合でも、せん断力の影響が卓越する条件下では生じる。

斜めひび割れは、分散的に生じる曲げひび割れに比べると、少数の大きなひび割れであるのが特徴であり、その発生時には大きなエネルギーが開放される。せん断補強鉄筋が配置されていなければ脆性的な破壊となる。せん断補強鉄筋により、斜めひび割れ発生後の急激な崩壊は防ぐことができるが、いずれにしても曲げ引張破壊のような、大きな変形によるエネルギー吸収は期待できない。

RC 部材は通常想定される荷重条件下では破壊しないように設計するのが当然である。し

かし、きわめてまれに生じる可能性のある過大な地震を受けた場合のことを考えると、破壊モードがどのようになるかを考慮して設計しておく必要がある。そこで、もし破壊する場合には、破壊モードが脆性的なせん断破壊となることを避け、ねばりのある曲げ破壊モードとなるように設計する。そのためには、設定した部材寸法・形状、鉄筋比、材料特性を用いた部材が、せん断破壊しないことを客観的な計算により確認しなければならない。このことより、せん断耐力の予測法が必要とされるのである。すなわち、与えられた荷重条件のもと、仮定した部材寸法・形状、鉄筋比、材料特性を用いた部材について、

$V_u$  : せん断耐力 (曲げ破壊せずにせん断破壊すると仮定して求めた終局せん断力)

$M_u$  : 曲げ耐力 (せん断破壊せずに曲げ破壊すると仮定して求めた終局曲げモーメント)  
を計算し、

$$\frac{V_u}{M_u/a} \geq 1$$

ここに、 $a$  : せん断スパン

であることを確認することにより、実際に生じる破壊モードが曲げ破壊であると判定することができる。この  $V_u/(M_u/a)$  をせん断余裕度ということがあり、部材の破壊モードを判定する際の指標とされる。

せん断余裕度が 1 より大きくても、その値があまり大きくない場合は、主鉄筋降伏後に斜めひび割れが発生し、破壊性状がせん断破壊に近い様相を呈する。そのため実設計では、せん断余裕度がより大きな値 (たとえば 2 以上) となるようにし、破壊モードが確実に曲げ破壊となるようにしている。

なお、RC 部材のせん断破壊は、桁、はり、柱等の棒部材のせん断破壊と、スラブ等の面部材の押し抜きせん断破壊がある。ここでは、棒部材のせん断破壊を中心に述べる。

### 3. RC 棒部材の斜めひび割れの発生メカニズム

部材のせん断耐力を予測することが、工学的に重要である。その算定法の説明の前に、せん断破壊の特徴である斜めひび割れの発生メカニズムについて考察する。図 2 は、曲げモーメントとせん断力を受ける RC はり内部の応力の流れを模式的に示したものである。

はりの片側半分を取り出したフリーボディに作用している外力は、作用荷重と支点反力、および切断面において作用していた圧縮側コンクリートの圧縮力 ( $C'$ ) と主鉄筋の引張力 ( $T_s$ ) である。さらにコンクリートと鉄筋とに分けて考えると、コンクリートには鉄筋との付着力が鉄筋に沿って作用していることになる。コンクリートと鉄筋との間の付着力とは、異形鉄筋のふしに起因するものである。

さて、このような力学的境界条件下にあるコンクリートの内部の応力状態はどうか。二次元弾性体などの仮定を設ければ、内部の応力分布を計算することはできるが、ここでは、そのような仮定に基づく厳密解よりも、定性的な物理イメージが重要である。はり中央上部から支点に向かって、はりの腹部に図 2 の下図のような圧縮力が流れ、各位置では、この圧縮力に直交するように引張力が発生するのが想像できるであろう。この引張力が斜めひび割れを発生させていたと考えられる。

ここで直感的に想像した「内部の力の流れ」とは、連続体内部の各位置における主応力

の方向を滑らかに結んだ線に相当する。実際に、二次元弾性解析によっても、**図 2** のような主応力の流れが示唆される。

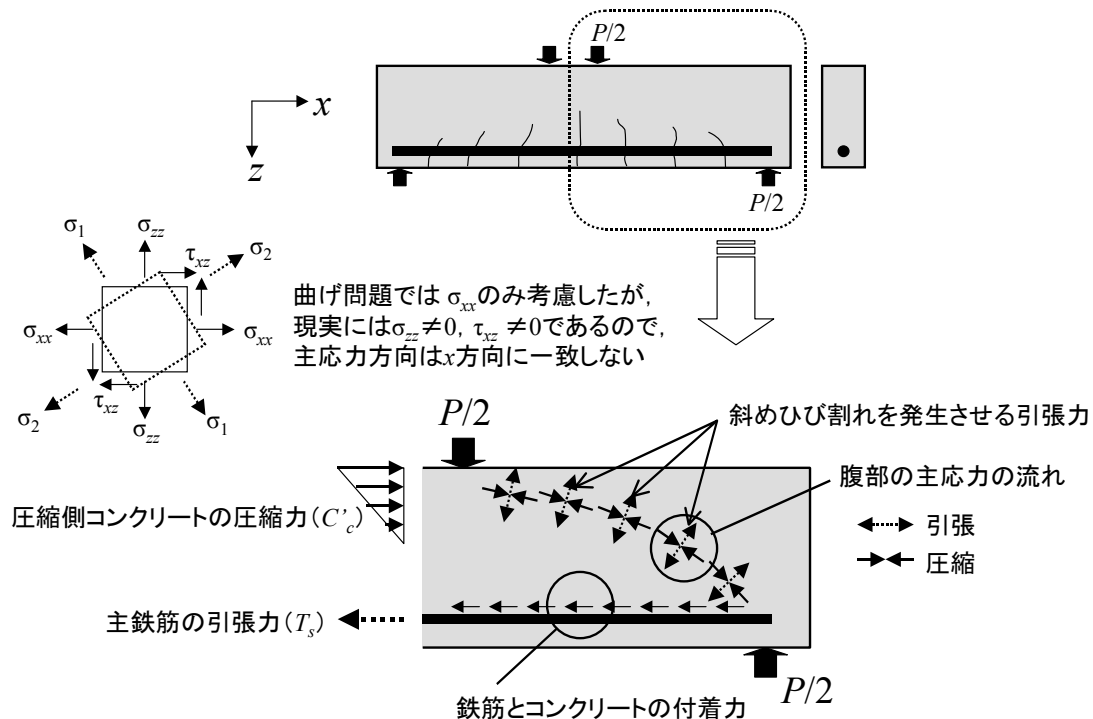


図 2 曲げモーメントとせん断力を受ける RC はり内部の応力の流れ

曲げモーメント、および曲げモーメントと軸力を受ける場合の問題では、はり理論に基づき、腹部のひずみ、応力ともに部材軸 ( $x$ ) 方向の成分しか考えなかった。それらの成分が、他成分に比べて卓越する場合を対象としていたからである。

一方、部材軸直交 ( $z$ ) 方向の成分、およびせん断 ( $xz$ ) 成分が存在する場合、主応力方向は部材軸 ( $x$ ) 方向とは一致しない。斜めひび割れによるせん断破壊が問題となるのは、この影響が無視できない条件下においてである。はり内部の応力の流れを考察した結果より考えると、せん断スパン比 ( $a/d$ ) が小さいほど、また主鉄筋とコンクリートの付着力が大きいほど、斜めひび割れの発生しやすい状態に近づくことが納得できるであろう。特に主鉄筋とコンクリートの付着力が原因のひとつとなっていることから、無筋コンクリートでは起こらず、鉄筋コンクリートに特有の現象であるといえる。

なお、破壊モードが曲げ破壊となる RC はりであっても、曲げモーメントとせん断力が作用するせん断スパン内では、曲げひび割れが部材軸直交方向ではなく、幾分斜めに進展する。これは、最終的な破壊モードこそ曲げ破壊であっても、斜めひび割れを発生させると同様の応力の流れが多少なりとも存在していることを表している。曲げモーメントのみが作用する条件下 (等曲げモーメント区間) では、そのようなことはなく、曲げひび割れは部材軸直交方向に進展する。

#### 4. RC 棒部材のせん断耐力算定法

##### (1) 概要

RC 部材のせん断破壊は、工学的に予測の必要性が高いにも関わらず、予測が困難な問題であったので、精力的に研究が進められてきた。その結果、その発生メカニズムもかなり明らかにされ、有限要素法等による数値解析により精度のよい予測も可能となってきた。しかし、RC 部材のせん断破壊に対しては、曲げ破壊におけるはり理論の適用に比べると、簡便で、物理的意味が明確で、かつ十分な予測精度を実現する力学モデルが存在しない。それゆえ、土木学会コンクリート標準示方書を含む、国内外の多くの設計基準では、RC 棒部材のせん断耐力算定法として、実験式を取り入れた方法が採用されている。

一般にせん断力を受ける部材には、せん断補強鉄筋が配置されている。図3は、はり部材と柱部材の例を示している。せん断補強鉄筋は、はり部材の場合には、スターラップ、あばら筋、柱部材の場合には、帯筋、フープ筋と呼ばれることもある。せん断補強鉄筋は、部材軸方向と角度を持って配置されるが、必ずしも直交方向とは限らず、斜めに配置されることもある。

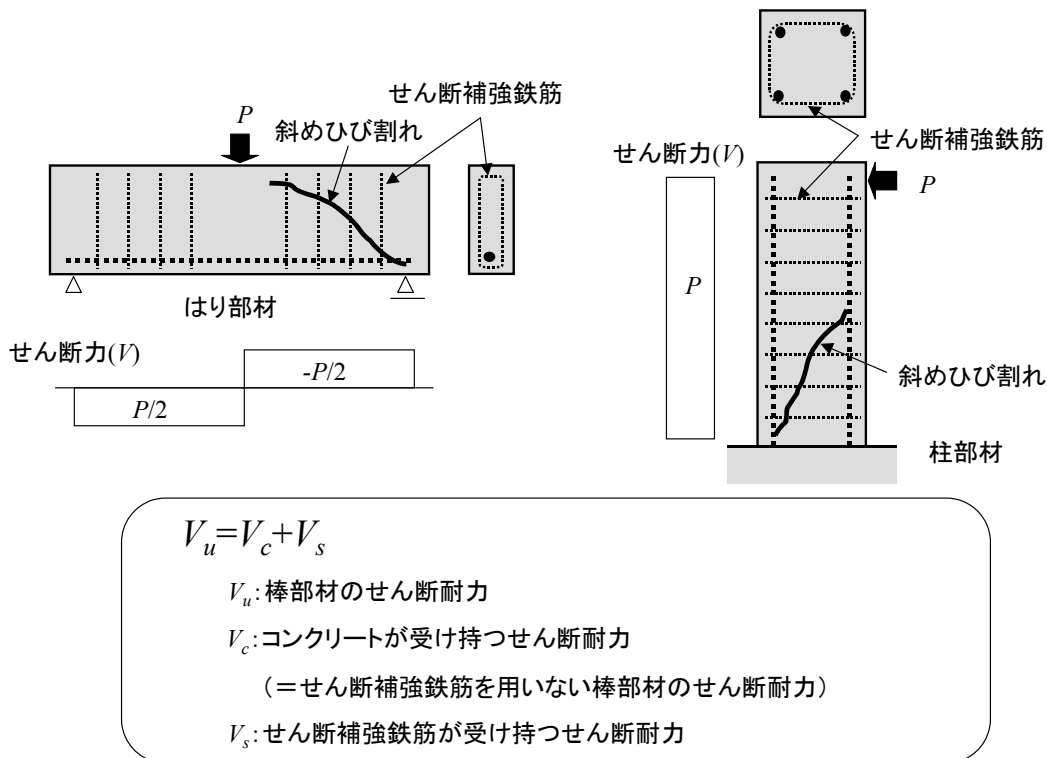


図3 RC 棒部材のせん断耐力算定法

RC 棒部材のせん断破壊過程の大略は、斜めひび割れが発生し、その後せん断補強鉄筋が力を受け持ち、最終的にせん断補強鉄筋が降伏するというものであった。工学的に最も知る必要性が高いのは、部材の最大せん断耐力であり、この場合、終局時のせん断耐力と考えてよい。終局時にはせん断補強鉄筋が降伏しているため、せん断補強鉄筋の受け持つ力を算定するのは、難しくはないと予想できる。ところが、終局時の部材のせん断耐力は、せん断補強鉄筋が受け持つと考えられるせん断耐力よりも大きいことが、実験的に明らか

にされている。これは、斜めひび割れ発生後も、圧縮部コンクリートにおけるせん断力の伝達、斜めひび割れ面におけるコンクリートの骨材のかみ合いによる力の伝達、引張主鉄筋のダウエル（ほぞ）効果、等のメカニズムによりせん断力が受け持たれるからである。

そこで、土木学会コンクリート標準示方書における RC 棒部材のせん断耐力算定法では、終局時においてせん断補強鉄筋の受け持つせん断耐力とそれ以外のメカニズムにより受け持たれるせん断力のそれぞれを評価し、両者の和により部材のせん断耐力を評価する方法が採用されている。せん断補強鉄筋以外のメカニズムにより受け持たれるせん断耐力は、圧縮部コンクリートにおけるせん断力の伝達、斜めひび割れ面におけるコンクリートの骨材のかみ合い等、大部分がコンクリートによるものであるので、示方書ではこれをコンクリートが受け持つせん断耐力と呼んでいる。

$$V_u = V_c + V_s \quad (1)$$

ここに、 $V_u$ ：棒部材のせん断耐力

$V_c$ ：コンクリートが受け持つせん断耐力

$V_s$ ：せん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力

である。

## (2) コンクリートが受け持つせん断耐力 $V_c$

コンクリートが受け持つせん断耐力  $V_c$ 、すなわち、斜めひび割れ発生後にせん断補強鉄筋以外のメカニズムにより受け持たれるせん断耐力は、理論的な予測が困難である。既往の研究において実験的検討がなされ、 $V_c$  は、斜めひび割れ発生時のせん断耐力と同程度であることが明らかにされた。せん断補強鉄筋を有する RC 棒部材であっても、せん断補強鉄筋が力を受け持ち始めるのは斜めひび割れ発生以後であるので、その部材の斜めひび割れ発生荷重は、同寸法でせん断補強鉄筋を有しない RC 部材の斜めひび割れ発生荷重にほぼ等しいと考えてよい。このことより、示方書では、 $V_c$  を「せん断補強鉄筋を用いない棒部材のせん断耐力」とも呼んでいる。

コンクリートが受け持つせん断耐力  $V_c$  は、理論的に算定することが困難であるので、実験式が用いられる。示方書では、以下の算定式が採用されている。

$$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vc} \cdot b \cdot d \quad (2)$$

ここに、 $f_{vc} = 0.20 \cdot \sqrt[3]{f'_c}$  (N/mm<sup>2</sup>) ( $f'_c$ ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>))

$b$ ：断面幅

$d$ ：有効高さ

$\beta_d = \sqrt[4]{1/d}$  (ただし  $d$  の単位は m)

$\beta_p = \sqrt[3]{100p}$  (ただし  $p$  は引張主鉄筋比)

$\beta_n$ ：式は省略する。軸方向力が 0 の場合  $\beta_n=1$  となる。

である。

式(2)は、実験式であるので、式の形に物理的意味はないが、シンプルで使いやすく、影響要因ごとに係数が設定され、わかりやすい。式の基本形は、コンクリートの見かけのせん断強度  $f_{vc}$  に、断面積を  $bd$  を乗じることにより、断面力としてのせん断力  $V_c$  を算定する形式となっている。 $\beta_d, \beta_p, \beta_n$  は、それぞれ、部材有効高さ、引張主鉄筋比、作用軸力がせん

断耐力に及ぼす影響を考慮するための係数であり、基本的な条件下では  $\beta_d=\beta_p=\beta_n=1$  となるように設定されている。

$f_{vc}$  は、コンクリート強度の影響を表したものであり、圧縮強度の関数となっている。入力値である圧縮強度  $f'_c$ 、算定される  $f_{vc}$  とともに、単位が  $\text{N}/\text{mm}^2$  であることに注意されたい。単位が変わると、係数 0.20 の値を変えなければならない。

実際の設計では、各種安全係数や、各変数の上下限值等に留意しなければならない。詳細はコンクリート標準示方書 [構造性能照査編] を参照すること。

### (3) せん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力 $V_s$

コンクリートが受け持つせん断耐力  $V_c$  は実験式により算定するのに対し、せん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力  $V_s$  はトラスモデルと呼ばれる力学モデルに基づいて算定される。

図 4 に示すように、斜めひび割れを跨いで力を受け持つせん断補強鉄筋の力を求め、その鉛直成分を  $V_s$  とするのである。

トラスモデルとは、圧縮側コンクリート、引張主鉄筋、腹部の斜め圧縮力を受け持つコンクリート、斜め引張力を受け持つせん断補強鉄筋を、それぞれトラス構造の弦材とみなし、RC 棒部材をトラス構造に置き換えて力の釣り合いを考えるモデルである。以下、示方書の方法を説明する。

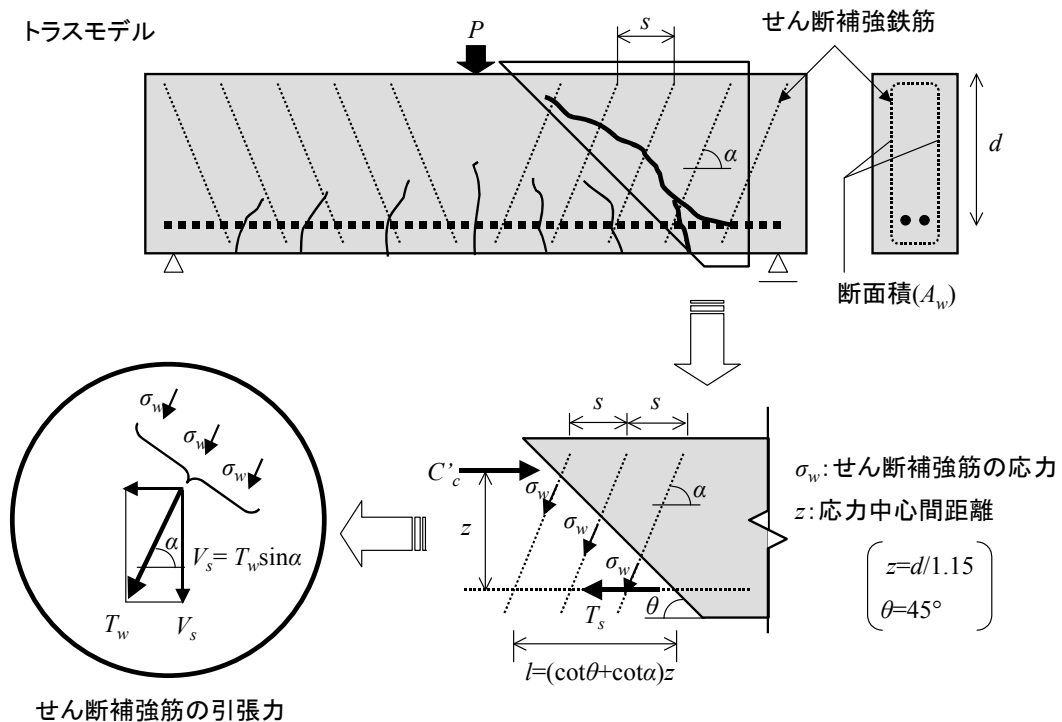


図 4 せん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力

圧縮側コンクリートの圧縮力の作用中心と引張主鉄筋との距離（応力中心間距離） $z$  は、 $d/1.15$ 、斜めひび割れの角度  $\theta$  は  $45^\circ$  としてよい。斜めひび割れを跨ぐせん断補強鉄筋の組数  $n$  は以下で求められる。

$$n = \frac{l}{s} = \frac{(\cot \theta + \cot \alpha)z}{s} = (1 + \cot \alpha) \frac{z}{s}$$

ここに、  $s$  : せん断補強鉄筋の間隔

$\alpha$  : せん断補強鉄筋と部材軸のなす角度

である。せん断補強鉄筋は必ずしも部材直交方向ではなく、角度を持って配置されることもあるので、一般性を持たせるために部材軸と成す角度を  $\alpha$  として表している。

一組のせん断補強鉄筋の断面積を  $A_w$  とする。せん断補強鉄筋の応力を  $\sigma_w$  と書くと、斜めひび割れを跨ぐせん断補強鉄筋の引張力の総和  $T_w$  は、

$$T_w = n \cdot A_w \cdot \sigma_w$$

その鉛直成分が  $V_s$  であるので、

$$\begin{aligned} V_s &= n \cdot A_w \cdot \sigma_w \cdot \sin \alpha \\ &= A_w \sigma_w (\sin \alpha + \cos \alpha) \frac{z}{s} \end{aligned}$$

終局時にはせん断補強鉄筋は降伏しているので、

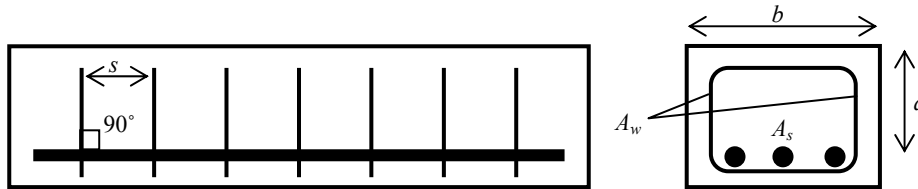
$$V_s = A_w f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) \frac{z}{s} \quad (3)$$

ここに、  $f_y$  : せん断補強鉄筋の降伏強度である。



**例題**

下図の RC はりのせん断耐力を求めよ。



寸法 :  $b=1000\text{mm}$ ,  $d=400\text{mm}$ ,  $s=200\text{mm}$ ,  $A_s=2000\text{mm}^2$ ,  $A_w=250\text{mm}^2$

コンクリートの圧縮強度 :  $f'_c=24\text{N/mm}^2$ , 鉄筋の降伏強度 :  $f_y=300\text{N/mm}^2$

**解答**

$$f_{vc} = 0.20 \cdot \sqrt[3]{f'_c} = 0.577 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} = \sqrt[4]{1/0.40} = 1.257$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p} = \sqrt[3]{100 \frac{A_s}{bd}} = 0.794$$

$$\beta_n = 1.0$$

より、コンクリートが受け持つせん断耐力  $V_c$  は、 $V_c = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vc} b d = 230\text{kN}$

また、せん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力  $V_s$  は、

$$V_s = A_w f_y (\cos 90 + \sin 90) \frac{z}{s} = A_w f_y (0 + 1) \frac{d/1.15}{s} = 131\text{kN}$$

よって、部材のせん断耐力  $V_u$  は、 $V_u = V_c + V_s = 361\text{kN} \approx 360\text{kN}$

**答 : 360kN**