スパイラル筋を使用した RC 梁のせん断強度 SHEAR STRENGTH OF R/C BEAMS WITH SPIRAL REINFORCEMENT

市之瀬敏勝*, 横尾 慎一**

Toshikatsu ICHINOSE and Shin-ichi YOKOO

Based on the upper bound theorem, the shear strength of R/C beams with spiral reinforcement is discussed considering its pitch. Three dimensional failure pattern is considered. Conclusions are as follows: (1) Spiral reinforcement is more liable to yield than closed shear reinforcement if their pitch is the same; (2) The shear strength of R/C beams with usual amount of spiral reinforcement is similar to that with the same amount of closed shear reinforcement. The difference appears when the spiral is very sparse and strong: beams with such spiral are stronger than those with closed shear reinforcement of the same pitch and strength.

Keywords: reinforced concrete, beam, spiral reinforcement, pitch, shear strength, upper bound theorem
鉄筋コンクリート, 梁, スパイラル筋, 補強筋間隔, せん断強度, 上界定理

1. はじめに

筆者ら¹⁾は, 塑性解析の上界定理を用いて, 閉鎖型せん断補強筋の間隔が RC 梁のせん断強度に及ぼす影響を調べた。その結果,

(1) せん断補強筋比が同じであっても, 補強筋間隔によってせん断強度は 40 % 程度変動する場合があること,

(2) 補強筋間隔によって,

$$p_w \cdot \sigma_{wy} / \sigma_e \approx 0.3 \dots \dots \dots (1)$$

p_w : せん断補強筋比

σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度

σ_e : コンクリートの有効圧縮強度 ($= \nu_0 \sigma_B$)

程度でもせん断補強筋が降伏しない場合があること, がわかった。本論文では, 再び上界定理を用いて, スパイラル筋のピッチが RC 梁のせん断強度に及ぼす影響を調べる。また, 閉鎖型補強筋との比較を行う。

2. 解析仮定

上界定理によるせん断強度算定に当たり, 前報¹⁾と同様に次のことを仮定する。

- (1) 主筋は十分に強く, 部材は曲げ降伏しない。
- (2) コンクリートは, 図-1 のような降伏曲面をもつ剛塑性材料とする。
- (3) スパイラル筋は剛塑性の応力-ひずみ関係をもつ。
- (4) 主筋とスパイラル筋のだば作用は無視する。

図-1 コンクリートの降伏曲面

図-2 コンクリートの有効範囲

(5) 部材のコンクリートは, 図-2 に定義する有効幅

$$b_e = b_t + d_b \dots \dots \dots (2)$$

b_t : 梁幅方向の最外縁主筋重心間距離,

d_b : 主筋径

と有効せい

$$j_e = j_t + d_b \dots \dots \dots (3)$$

j_t : 梁せい方向の最外縁主筋重心間距離で囲まれる範囲で有効であるとする。

3. スパイラル筋を使用した梁のせん断強度

主筋が十分強いと仮定しているため, 部材は材軸方向に伸縮することはない。したがって, 主筋は塑性仕事をせず, 部材のなす塑性仕事は次式で表される。

$$W_e = W_c + W_s \dots \dots \dots (4)$$

W_e : せん断力による外部仕事

W_c : コンクリートの内部仕事

W_s : せん断補強筋の内部仕事

* 名古屋工業大学 助教授・博士(工学)

** 清水建設・修士(工学)

Assoc. Prof., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
Shimizu Corporation, M. Eng.

図—3 閉鎖型筋を用いた部材の破壊面（補強筋が降伏しない場合）

(a) ねじれない一平面

(b) 立体的な二平面

図—4 スパイラル筋を用いた部材の破壊面（補強筋が降伏しない場合）

上界定理の解は、せん断力による外部仕事 W_e が最小値となるときである。せん断補強筋による内部仕事 W_s が同じならば、破壊面は、コンクリートの内部仕事 W_c が小さくなるように生じるはずである。前報¹⁾で示したように、閉鎖型のせん断補強筋を用いた部材のせん断破壊面は、図—3のような単純な平面となる。しかし、スパイラル筋を用いた場合、補強筋の掛かり具合がねじれているため、破壊面もねじれたものになる可能性がある。

まず、スパイラル筋が降伏しない破壊モード（閉鎖型の図—3に対応）について考えてみる。閉鎖型と同様に、コンクリートの破壊面をねじれない一平面だと仮定すれば、破壊面は図—4(a)のような点 A, B, C, D を

図—5 破壊モード（スパイラル）

図—6 部材両端を結ぶ破壊面 ($N=7/2$)

結ぶ平面となる。点 A, C は、主筋とスパイラル筋の交点に位置する。点 C において、破壊面がスパイラル筋の折り曲げ部分を横断しているが、だば作用無視の仮定により、このスパイラル筋は仕事をしないと考える。

ここで、点 A, B, C, D は必ずしも一平面上にある必要はない。コンクリートの内部仕事が小さくなるように、点 B は点 E の方向へ、点 D は点 F の方向へ移動することができる。つまり、図—4(b) のような、 $\triangle ABC$ と $\triangle ACD$ の二平面で構成される破壊面が考えられる（詳細は付録 1）。ほとんどの場合、点 B は点 E に一致する。一方、点 D は補強筋間隔が密な場合にだけ点 F に一致する（付録 2）。図—4(b) を $n=0$ の破壊モードと呼び、図—5(a) に再掲する。ここで、 n は破壊面を横断するスパイラル筋の組数、すなわち、降伏するスパイラル筋の組数を表す。

スパイラル筋が降伏するモードも同様に定義できる。片側のスパイラル筋一本（●印）のみが引張降伏するモードは図—5(b) のようになる。これを、 $n=1/2$ のモードと呼ぶ。また、両側のスパイラル筋 2 本（1 組）が引張降伏するモードは図—5(c) のようになる。これを、 $n=1$ のモードと呼ぶ。

結局、部材は図—5(a)～(d) のような $n=[0, 1/2,$

図—7 各破壊モードのせん断強度と補強筋量

1, 3/2, ……] の各破壊モードのうち、せん断力による外部仕事 W_e が最小値となるモードでせん断破壊する。各破壊モードでのせん断強度 V_n は、付録3に記述する強度式によって得られる。ただし、部材の長さは有限であるから、 n は図—6に示す N (部材両端を結ぶ破壊面と交わるスパイラル筋の組数) を超えることはできない。

スパイラル筋のピッチ s を固定し、降伏強度 σ_{wy} のみを変化させた場合のせん断強度について考えてみる。 $N=3$ の場合について例示すると、各破壊モードのせん断強度 V_n と補強筋量の関係は、図—7のような4本の破線 ($n=0, 1, 2, 3$) と3本の実線 ($n=1/2, 3/2, 5/2$) で表される。ただし、横軸のせん断補強筋比 p_{we} は通常の見方とは異なり、

$$p_{we} = A_v / (b_e \cdot s) \dots \dots \dots (5)$$

A_v : スパイラル筋の一組の断面積 (2本分)

s : スパイラル筋のピッチ

とする。部材のせん断強度 V は、各破壊モードのせん断強度 V_n のうち最小の値を取るのので、せん断強度 V と補強筋量の関係は、点A-B-C-D-E-Fを通る折れ線となる。点Eは、せん断強度が頭打ちとなる点であり、「補強限界」と呼ぶ。この図で、 $n=1, 2$ の破線はA~Fの折れ線よりも上側にある。これは、 $n=1, 2$ のモードでは破壊が生じないことを意味する。実際、後述の解析例では、すべて $n=[0, 1/2, 3/2, \dots]$ のいずれかの破壊モードで決まり、 n =自然数 (1, 2, ……) となる破壊モードは生じなかった。

4. スパイラル筋と閉鎖型補強筋の比較

スパイラル筋と閉鎖型補強筋が、部材のせん断強度に及ぼす影響を比較する。

断面形状が $b_e = j_e/2$ の部材について、補強筋間隔 s を $s=0, j_e/5, j_e/2$ としたときのせん断強度と補強筋量の関係を図—8(a)に示す。ただし、部材は十分に長いとする。図中、実線はスパイラル筋、破線は閉鎖型補強筋である。また、スパイラル筋の補強限界を○印で、閉鎖型筋の補強限界を△印で示す。図より、閉鎖型を用いた部材の補強限界より小さなせん断補強レベル (△の

(a) $b_e = j_e/2$ (b) $b_e = j_e$

図—8 せん断強度と補強筋量

左側) では、スパイラル・閉鎖型のせん断強度はほぼ同じであると言える。これより大きなせん断補強レベル (△の右側) では、スパイラルが閉鎖型を上回る。断面形状が $b_e = j_e$ の部材については、図—8(b)のように、スパイラルと閉鎖型で、せん断強度の差は余り見られない。

ここで、閉鎖型筋の補強限界について考えてみると、例えば $s = j_e/2$ の場合、 $p_{we} \sigma_{wy} \doteq 0.2 \sigma_e$ であり、通常の建物部材に比べるとかなり高いせん断補強レベルである。したがって、通常のせん断補強レベルでは、閉鎖型とスパイラルのせん断強度はほぼ等しい、と言える。

せん断補強筋が降伏するための補強筋間隔と補強筋量の関係を図—9に示す。実線はスパイラル、破線は閉鎖型の補強限界である。そして、図のハッチ部分の領域が閉鎖型補強筋が降伏する条件を表している。スパイラル筋の補強限界は、閉鎖型に比べ大きい。すなわち、補強

図—9 セン断補強筋が降伏するための補強筋間隔と補強筋量

筋間隔が同じであれば、閉鎖型よりスパイラル筋の方が降伏しやすい。その差は、 b_e/j_e が大きい部材ほど顕著である。

5. 破壊モードの検証

部材の最大せん断強度 V_{max} を付録3の V_n に代入すると、各破壊モードに対応するコンクリート有効圧縮強度 σ_e 、 n が逆算される。このうち、最大の σ_e 、 n が真の有効圧縮強度 σ_e である。また、最大の σ_e 、 n を与える破壊モードが真の破壊モードである。破壊モードが $n=3$ であれば、部材の補強筋は3組以上降伏することになる（前報¹⁾参照）。 $n=1/2$ では、片側（図—5の手前側）のみの補強筋が降伏し、もう片側は降伏しない。 $n=0$ では、補強筋は1組も降伏しないことになる。

部材強度から逆算された破壊モード n と補強筋量との関係を図—10(a) に示す。解析の対象は、狩野ら^{2),3)}、渡辺ら^{4),5)}の試験体である。図中、実験で補強筋が降伏した試験体を○印、降伏しなかった試験体を△印で表す。

(a) 有効断面による補強筋比 ρ_{we} (b) 通常の補強筋比 ρ_w による場合図—10 破壊モード n とせん断補強筋量

(a) 閉鎖型筋

(b) スパイラル筋

図—11 コンクリートの圧縮強度 σ_B と有効圧縮強度 σ_e

横軸の分母、有効圧縮強度 σ_e は逆算された値（ σ_e 、 n の最大値）を使用している。解析データ 21 個のうち、せん断補強筋の降伏の有無について実験結果と一致しなかったデータは 3 個であった。参考までに、通常定義による補強筋比 ρ_w を用いたグラフを図—10(b) に示す。

6. 有効圧縮強度の逆算

狩野ら^{2),3)}、渡辺ら^{4),5)}、野口ら⁶⁾の実験結果から逆算したコンクリートの有効圧縮強度 σ_e と圧縮強度 σ_B の関係を図—11(a) (b) に示す。図中、実験でせん断補強筋が降伏した試験体を○印、降伏しなかった試験体を△印で表す。この図から、コンクリートの有効圧縮強度 σ_e を次式のように近似する（図中の太線）。

$\sigma_B \leq 20$ MPa のとき

$$\sigma_e = 0.85 \cdot \sigma_B \quad (\text{MPa}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$\sigma_B > 20$ MPa のとき

$$\sigma_e = 0.4 \cdot \sigma_B + 9 \quad (\text{MPa}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

(a) 閉鎖型筋

(b) スパイラル筋

図—12 実験との比較

7. 既往の実験との比較

コンクリート有効圧縮強度の算定に式(6)(7)を用いて、狩野ら^{2),3)}、渡辺ら^{4),5)}、野口ら⁶⁾の実験結果と解析結果を比較する。比較結果を図-12(a)(b)に示す。図中の記号は図-11と同じである。 V_{max} は実験値最大強度、 V_{cal} はせん断強度計画値である。データ数53個、平均値0.99、標準偏差0.13であり、本論文のせん断強度算定方法は、実験結果をうまく評価していると言える。

8. 結 論

立体的な破壊面と補強筋間隔を考慮した上界定理によってせん断強度を計算した結果、次の結論を得た。

- (1) スパイラル筋の補強限界は、閉鎖型に比べ大きい。すなわち、補強筋間隔が同じであれば、閉鎖型よりスパイラル筋の方が降伏しやすい。その差は、せいに比べて幅の狭い梁ほど顕著である。
- (2) 閉鎖型筋の補強限界より大きなせん断補強レベルでは、スパイラル筋を用いた梁のせん断強度が閉鎖型を上回る。しかし、通常のせん断補強レベルでは、閉鎖型とスパイラルのせん断強度はほぼ等しい。したがって、スパイラル筋を用いた梁においても、補強筋間隔の影響は、閉鎖型と同程度に大きいと言える。
- (3) 本論文の解析方法によれば、コンクリートの有効圧縮強度 σ_c は式(6)(7)で近似できる。

参考文献

- 1) 市之瀬敏勝，横尾慎一：せん断補強筋間隔がRC梁のせん断強度に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文報告集，1992年7月
- 2) 植松卓二，高木仁之，新田隆雄，奥出久人，狩野芳一：高強度せん断補強筋を用いたRCはりのせん断実験（その1，その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.711～714，1989
- 3) 狩野芳一，高木仁之，田中礼治，大芳賀義善：高強度せん断補強筋を用いたRCはりのせん断実験（その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.715～716，1989
- 4) 慶 祐一，榎本浩之，渡辺史夫，六車 照：高強度コンクリートを用いた梁のせん断強度に関する研究，（その1 $f'_c=600\text{ kg/cm}^2$ ， 800 kg/cm^2 に関する研究），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.269～270，1991
- 5) 榎本浩之，慶 祐一，渡辺史夫，六車 照：高強度コンクリートを用いた梁のせん断強度に関する研究，（その2 せん断強度の評価），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.271～272，1991
- 6) 雨宮 篤，野口 博：超高強度RC梁のせん断強度に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.273～274，1991

付録1 立体破壊面の形状

本文中では、 $n=0$ のモードに関して、付図-1(a)（図-4(b)と同一）のような破壊面が考えられる、と書いた。しかし例えば、付図-1(b)のように、 $\triangle ABD'$ と $\triangle BCD'$ の2平面で構成され

(a) 破壊面が $\triangle ABC$ と $\triangle ACD$ で構成される場合

(b) 破壊面が $\triangle ABC'$ と $\triangle BCD'$ で構成される場合
付図-1 立体破壊面の座標（スパイラル）

る破壊面も想定可能であるし、その他、より複雑な破壊面も想定可能である。部材がどの破壊面でせん断破壊するのは、コンクリートの内部仕事 W_c を比較すれば良い。結論から先に述べよう。付図-1(a)の W_c は、付図-1(b)より必ず低い。したがって、付図-1(a)の方がより正解に近い。ただし、その差は高々1%である（後述）。付図-1(a)の折れ曲がり2平面よりは、同図の点ABCDを通る最小面積の曲面（石鹼膜面）の方が若干小さい W_c となる可能性もある。しかし、付図-1(a)(b)の W_c の違いが1%未満であることから考えれば、付図-1(a)の破壊面で実用上は十分であるものと判断できる。

① 付図-1(a)のコンクリート内部仕事

立体破壊面の座標を付図-1(a)のように決める。

まず、 $\triangle ABC$ のコンクリート内部仕事を求める。

$\triangle ABC$ の面積 A_{a1} は、

$$A_{a1} = \frac{1}{2} \sqrt{(j_e \cdot p)^2 + b_e^2 (q-p)^2 + (b_e \cdot j_e)^2} \dots \dots \dots (A-1)$$

$\triangle ABC$ の法線ベクトル（付図-1の n_{a1} ）は、

$$\left[\frac{j_e \cdot p}{2 A_{ai}}, \frac{b_e(q-p)}{2 A_{ai}}, \frac{b_e \cdot j_e}{2 A_{ai}} \right] \dots \dots \dots (A-2)$$

△ABCの法線ベクトルがY方向(変位方向)となす角度 θ_{ai} は、上式ベクトルと(0, 1, 0)の内積より、

$$\cos \theta_{ai} = \frac{b_e(q-p)}{2 A_{ai}} \dots \dots \dots (A-3)$$

△ABCの内部仕事 W_{cai} は、

$$W_{cai} = \frac{(1 - \cos \theta_{ai}) \cdot A_{ai}}{2} \cdot \sigma_e \cdot u \dots \dots \dots (A-4)$$

となる。次に、△ACDのコンクリート内部仕事を求める。

△ABDの面積 A_{ad} は、

$$A_{ad} = \frac{1}{2} \sqrt{j_e^2(r-q)^2 + (b_e \cdot r)^2 + (b_e \cdot j_e)^2} \dots \dots \dots (A-5)$$

△ACDの法線ベクトルは、

$$\left[\frac{j_e(r-q)}{2 A_{ad}}, \frac{b_e \cdot r}{2 A_{ad}}, \frac{b_e \cdot j_e}{2 A_{ad}} \right] \dots \dots \dots (A-6)$$

△ACDの法線ベクトルがY方向(変位方向)となす角度 θ_{ad} は、上式のベクトルと(0, 1, 0)の内積より、

$$\cos \theta_{ad} = \frac{b_e \cdot r}{2 A_{ad}} \dots \dots \dots (A-7)$$

△ACDの内部仕事 W_{cad} は、

$$W_{cad} = \frac{(1 - \cos \theta_{ad}) \cdot A_{ad}}{2} \cdot \sigma_e \cdot u \dots \dots \dots (A-8)$$

となる。

したがって、付図-1(a)のコンクリート内部仕事 W_{ca} は式(A-4)

(A-8)の和で与えられ、

$$W_{ca} = \frac{(1 - \cos \theta_{ai}) A_{ai} + (1 - \cos \theta_{ad}) A_{ad}}{2} \cdot \sigma_e \cdot u \dots \dots \dots (A-9)$$

となる。なお、付図-1(a)の座標点 p, q, r については付録2で述べる。

② 付図-1(a) (b)のコンクリート内部仕事との比較

付図-1(b)のコンクリート内部仕事 W_{cb} も上と同様にして計算できる。 W_{cb}/W_{ca} の比を数値計算により求めたところ、

$$\left. \begin{array}{l} 0.1 \leq \frac{b_e}{j_e} \leq 1.0 \\ 0.01 \leq \frac{s}{j_e} \leq 1.0 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (A-10)$$

の範囲内で、 $W_{cb}/W_{ca} = 0.99 \sim 1.00$ であった。つまり、 W_{cb} は W_{ca} よりも必ず大きい、その差は1%未満であるという結果を得た。

付録2 立体破壊面の座標

付図-1(a)の座標値 p, q, r について考える。まず、点Cは、点Aから半巻進んだ位置にあることから、スパイラル筋の間隔を s とすると、

$$q = s/2 \dots \dots \dots (A-11)$$

となる。点Dは、2つの条件から決まる。第1に、式(A-8)の W_{cad} が最小となる条件、 $dW_{cad}/dr = 0$ より

$$r_1 = \frac{j_e^2 q + b_e^2 \sqrt{b_e^2 + j_e^2} + q^2}{b_e^2 + j_e^2} \dots \dots \dots (A-12)$$

を得る。第2に、 $n=0$ 、つまり補強筋をまたぐことがないモードを前提としているので、点Fを超えることはないという条件より、

$$r_2 = s + \frac{s \cdot j_e}{2(b_e + j_e)} \dots \dots \dots (A-13)$$

を得る。結局、 r は上式のうちの小さい方として、

(a) $b_e = j_e/2$

(b) $b_e = j_e$

付図-2 点B, Dが点E, Fに一致する条件

$$r = \min(r_1, r_2) \dots \dots \dots (A-14)$$

で与えられる。C点とD点の材軸方向の相対距離 $(r-q)$ を補強筋間隔 s で基準化した結果を、付図-2(a) (b)に実線で示す。図中の直線①-②は、点Dが点Fに一致したことを表す。図中の②から右下に下がる曲線は、点Dが点Fの内側にあることを表す。すなわち r が式(A-12)で決定されたことを表す。図中の②から右下に下がる曲線は、点Dが点Fの内側にあることを表す。すなわち r が式(A-11)で決定されたことを表す。 b_e/j_e が大きくなり、 s/j_e が小さいほど、点Dが点Fに一致しやすいことがわかる。

点Bの座標 p も、同様にして決定される。すなわち、付図-1(a)では点Bがスパイラルのコーナー、点Eに一致するように描いてあるが、厳密には、まず $dW_{cai}/dp = 0$ より

$$p_1 = \frac{b_e^2 q - b_e^2 \sqrt{b_e^2 + j_e^2} + q^2}{b_e^2 + j_e^2} \dots \dots \dots (A-15)$$

を得る。式(A-11)と(A-14)を比べると、 $-p_1 = r_1 - q$ であることがわかる。したがって、 $-p_1/s$ は、付図-2(a) (b)の②から右下に下がる曲線で表される。次に、点Bがスパイラルのコーナー、点Eに一致するという条件から、

$$p_2 = -\frac{s \cdot b_e}{2(b_e + j_e)} \dots \dots \dots (A-16)$$

を得る。これは、付図-2(a) (b)の破線で表される。結局 p は、 $p = \min(p_1, p_2) \dots \dots \dots (A-17)$

となる。付図-2(a)の③より右側では $p = p_1$ となり点Bと点Eとが離れるが、これは $s/j_e \geq 0.9$ というかなり特殊なケースである。それ以外はすべて点Bと点Eが一致する。以下の計算では点Bと点Eが一致すると考えて進める。

付録3 スパイラル筋のせん断強度式

付図-3(a) (b)の各破壊モード n における座標点 p, q_n, r_n の値は、付録2と同様にして求められ、次のようになる。

$$p = -\frac{b_e}{b_e + j_e} \cdot \frac{s}{2} \dots \dots \dots (A-18)$$

$$q_n \begin{cases} n=0, 1, 2, \dots & q_n = \frac{2n+1}{2} s \dots\dots\dots (A-19) \\ n=\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots & q_n = (n+1)s \dots\dots\dots (A-20) \end{cases}$$

$$r_n \begin{cases} n=0, 1, 2, \dots & r_n = \min(r_{n1}, r_{n2}) \dots\dots\dots (A-21) \\ \text{ただし, } r_{n1} = \frac{j_e^2 \cdot q_n + b_e^2 \sqrt{b_e^2 + j_e^2 + q_n^2}}{b_e^2 + j_e^2} \dots\dots\dots (A-22) \\ r_{n2} = \left[2(n+1) + \frac{j_e}{b_e + j_e} \right] \cdot \frac{s}{2} \dots\dots\dots (A-23) \\ n=\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots & r_n = \left(2n+1 + \frac{j_e}{b_e + j_e} \right) \cdot \frac{s}{2} \dots\dots\dots (A-24) \end{cases}$$

△ABC のコンクリートの内部仕事 $W_{1,n}$ は,

$$W_{1,n} = \frac{\sqrt{(j_e \cdot p)^2 + (b_e \cdot j_e)^2 + b_e^2(p - q_n)^2} - b_e(q_n - p)}{4} \cdot \sigma_e \cdot u \dots\dots\dots (A-25)$$

△ACD のコンクリートの内部仕事 $W_{2,n}$ は,

$$W_{2,n} = \frac{\sqrt{(b_e^2 + j_e^2)r_n^2 - 2q_n r_n j_e^2 + (q_n^2 + b_e^2)j_e^2} - b_e \cdot r_n}{4} \cdot \sigma_e \cdot u$$

$$\dots\dots\dots (A-26)$$

破壊面のコンクリートの内部仕事 W_c , n は,

$$W_{c,n} = W_{1,n} + W_{2,n} \dots\dots\dots (A-27)$$

破壊面を横断するスパイラル筋の内部仕事 $W_{s,n}$ は,

$$W_{s,n} = [n \cdot A_v \cdot \sigma_{wy} \cdot \sin \alpha] u \dots\dots\dots (A-28)$$

ただし, 角度 α は, 材軸とスパイラル筋のなす角度で, 次式で与えられる。

$$\sin \alpha = \frac{2(b_e + j_e)}{\sqrt{4(b_e + j_e)^2 + s^2}} \dots\dots\dots (A-29)$$

各破壊モード n におけるせん断力の外部仕事 $W_{e,n}$ は,

$$W_{e,n} = u \cdot V_n = W_{c,n} + W_{s,n} \dots\dots\dots (A-30)$$

となる。部材のせん断強度 V は各破壊モード n のせん断強度 V_n の最小値をとる。

(1992 年 4 月 10 日原稿受理, 1992 年 8 月 4 日採用決定)