

コンクリート部材におけるせん断耐力評価式の信頼性

大島義信・林 克弘・高瀬 弘・石田雅博

1. はじめに

斜め引張破壊に対するせん断耐力が、はじめて道路橋示方書（以下「道示」という。）に規定されたのは、昭和39年制定の鉄筋コンクリート道示からである。そこでは、古典的なトラス理論によるはりのせん断耐力（斜め引張破壊） S_u が規定されていた。コンクリート部材では、一般に部材に生じる斜め方向の引張応力に抵抗するよう、せん断補強鉄筋を配置する。古典的なトラス理論では、このせん断補強鉄筋（ S_s ）のみが斜めひび割れ発生後にせん断力に抵抗する（ $S_u = S_s$ ）と仮定している。

その後、昭和53年制定の道示Ⅲコンクリート橋編以降からは、修正トラス理論¹⁾に基づくせん断耐力が規定された。修正トラス理論によるせん断耐力 S'_u は、斜めひび割れが発生した後も、せん断補強鉄筋（ S_s ）だけでなく、コンクリート（ S_c ）もせん断力に抵抗する（ $S'_u = S_c + S_s$ ）ことを仮定している。この考え方は、古典的なトラス理論よりも合理的で実際に近いことから、平成29年制定の道示Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編においてもその考え方が踏襲されている。

コンクリートが負担するせん断力 S_c については、トラス理論によるせん断耐力の補正項という位置づけであり、その値はせん断補強鉄筋のないはり部材に対する実験結果に基づき定められている。この補正項について、平成24年制定の道示まで上部構造と下部構造で異なった評価式が与えられていたが、平成29年の改定において統一が図られている。その結果、コンクリート部材のせん断耐力に対して、部材の種類によらず信頼性の高い評価が行えるようになってきている。

評価式の統一にあたり、土木研究所構造物メンテナンス研究センターでは、これまで道示で規定されていた評価式に対する考え方や適用範囲を整理し、一般化された耐力式における補正項の適用

範囲や耐力のばらつきについて評価を行った²⁾。本稿では、その概要について報告する。

2. 道路橋示方書におけるせん断耐力式

平成24年制定の道示Ⅲコンクリート橋編に規定されているコンクリートが負担するせん断力 S_c は、基本的に桁部材を対象として、割増し係数 k 、ウェブ幅 b_w 、有効高さ d 、平均せん断応力度 τ_c を用いて式(1)により与えられている。

$$S_c = k\tau_c b_w d \quad \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

なお、式中の平均せん断応力度 τ_c は、軸方向鉄筋量や桁高による寸法効果を考慮しないものとなっているが、式(2)に示す割増し係数 k によって、軸方向圧縮力（プレストレス含む）の効果が考慮されている。

$$k = 1 + M_0/M_d \leq 2 \quad \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

ここで、 M_0 はデコンプレッションモーメント（引張縁応力度がゼロとなる曲げモーメント）、 M_d は照査断面における設計曲げモーメントである。

一方、平成24年制定の道示Ⅴ耐震設計編に規定されているコンクリートが負担するせん断力 S_c は、鉄筋コンクリート構造の鉛直部材を対象として、寸法効果（部材高さ）および軸方向引張鉄筋の影響を考慮した式(3)により与えられている。

$$S_c = c_c c_e c_{pt} \tau_c b_w d \quad \dots\dots\dots \text{式(3)}$$

ここで、 $\tau_c = 0.453 \times (24/\sigma_{ck})^{-1/3}/1.3$ 、 $c_e = d^{-0.33}$ 、 $c_{pt} = (0.3/p_t)^{-1/3}$ 、 c_c は作用の繰返しを考慮する係数である。なお、式中の平均せん断応力度 τ_c は、軸方向引張鉄筋比 $p_t = 0.3\%$ 、コンクリート設計基準強度 $\sigma_{ck} = 24(\text{N/mm}^2)$ 、部材高さ $d = 1.0(\text{m})$ として、その値を超下回る確率が2.3%となる値となっている²⁾。

式(3)は、寸法効果や軸方向引張鉄筋の影響を考慮するものとなっているが、式(1)のように軸方向圧縮力の影響については考慮されていない。

3. 一般化のための検討

3.1 軸方向力の影響

本研究では、寸法効果などを考慮できる式(3)を基本として、その式を棒部材全般に一般化することを試みた。

式(3)では、軸方向力の影響を考慮していないため、適切にその効果を考慮する必要がある。軸方向力の影響を考慮する方法には、式(2)のように直接的にせん断耐力を割増しする方法と、次式のように補正項として加える方法がある。

$$S_c = c_c c_e c_{pt} \tau_c b_w d + S_d \cdot M_0 / M_d \dots\dots\dots \text{式(4)}$$

ただし、 S_d は照査断面における設計せん断力である。

軸方向力等の影響については、桁高の変化などによらないことが明らかとなっている。そのため、本研究では軸方向力等の影響を独立して考慮できる式(4)の方法にて、その影響を考慮することとした。

3.2 コンクリートが負担するせん断力の適用範囲

3.2.1 前提条件

はじめに、式(4)の前提条件について整理を行った。式(4)による S_c は、曲げせん断ひび割れを想定した耐力であるため、曲げせん断ひび割れの発生する範囲に照査断面があること、また、ウェブせん断ひび割れが先行しないことが条件となる。ウェブせん断ひび割れと曲げせん断ひび割れの概念図を図-1に示す。

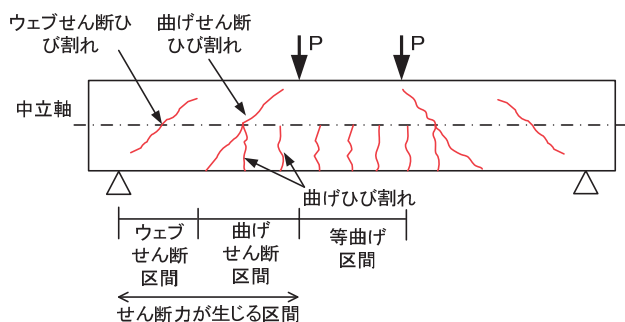


図-1 ウェブせん断ひび割れと曲げせん断ひび割れの概念図(はりの例：せん断スパン比3~4)

まず、照査断面が曲げせん断区間内にあるためには、曲げひび割れの発生が先行する必要があるため、少なくともプレストレス力による曲げひび割れの抑制効果よりも、作用モーメントが大きくなってはならない。すなわち $M_0/M_d \leq 1.0$ である

ことが求められる。一方、ウェブに斜めひび割れが発生しないためには、ウェブ中心位置（矩形換算した断面の中心）において生じる主引張力が引張強度以下であることが求められる。すなわち、せん断力が式(5)を上回らないことが求められる。

$$V_{max} = \frac{2}{3} b_w d \sqrt{\sigma_{ctd} \cdot (\sigma_{ctd} + \alpha \cdot \sigma_{cdm})} \dots\dots\dots \text{式(5)}$$

ここで、 σ_{ctd} をコンクリートの引張強度(N/mm²)
 α を低減係数（プレストレス効果に対する係数）、 σ_{cdm} をウェブ中心位置における有効プレストレスによる軸方向圧縮応力度(N/mm²)である。

3.2.2 パラメータの適用範囲

式(3)には、軸方向引張鉄筋比 p_t をパラメータとした補正係数 $c_{pt} = (0.3/p_t)^{\frac{1}{3}}$ が与えられているが、 p_t の効果はある程度で頭打ちとなる。その上限値は設計実績等から3%とし、 p_t が3%を超える場合には3%での補正值を与えることとした。また、 p_t が0.1%以下の場合、効果の有効性が実験的に確認されていないことから、 p_t を0.1%とした場合の補正值を下限値とした。これより、 c_{pt} の適用範囲は、 $0.7 \leq c_{pt} \leq 2.2$ とした。

また、式(3)には、土木研究所における大型鉄筋コンクリートはりのせん断載荷試験結果や過去の実験結果等を参考に、寸法効果を考慮する係数 c_e が与えられている。その適用範囲は、設計実績等から、 $0.5 \leq c_e \leq 1.4$ （ d を部材有効高として $0.3m \leq d \leq 10m$ 、 $0.3m$ 未満は $0.3m$ の値、 $10m$ を超える場合は $10m$ の値を用いる）とした。

3.3 せん断補強鉄筋が負担するせん断力の適用範囲

ACI318²⁾から、以下の事項が修正トラス理論の前提とされている。

- ①せん断補強鉄筋が降伏した後、はりの破壊が起こるようウェブ圧壊（トラスのコンクリート圧縮斜材の圧壊）が生じない。
- ②斜めひびわれ発生後、はり内力の再分配を可能とするために、せん断補強鉄筋の鉄筋量を0.2%以上とする。
- ③せん断補強鉄筋が降伏点に達した後に、はりとしての破壊が起こることが確認されている降伏強度の範囲で適用する。

①の検討にあたっては、コンクリート圧縮斜材の角度が重要となる。トラス理論では、コンク

リート圧縮斜材の角度によって、せん断補強鉄筋が負担するせん断力が異なるためである。

上載荷重を受ける弾性はりの中立軸位置における主応力の角度は45°であり、ひび割れの角度もほぼこの方向と一致する。トラス理論では、ひび割れの始点と終点を圧縮域とした直線を仮定するが、実際には折れ線となるひび割れを直線でモデル化しても安全側となることが知られている³⁾。よって、一般化にあたっては、トラス理論の圧縮斜材の角度の最大値を45°と仮定した。

②については、せん断補強鉄筋が多すぎると、せん断補強鉄筋が降伏に至る前にウェブ圧壊が生じることになるため、せん断補強鉄筋量に上限値が設けられている。せん断補強鉄筋が降伏するときのせん断力をせん断耐力と考えた場合、せん断補強鉄筋が降伏すると同時に、ウェブ圧壊に達するときのせん断補強鉄筋量が、有効なせん断補強鉄筋量としての上限値となる。ウェブ圧壊のせん断耐力から、斜め引張破壊におけるコンクリート負担分を差し引くことで得られる、最大せん断補強鉄筋量は図-2のとおりとなる。図より、有効なせん断補強鉄筋量は最大でも2%程度以下であることがわかる。

③の条件については、これまでの実績を踏まえ、せん断補強鉄筋に対する応力度の上限値を345MPaとした。

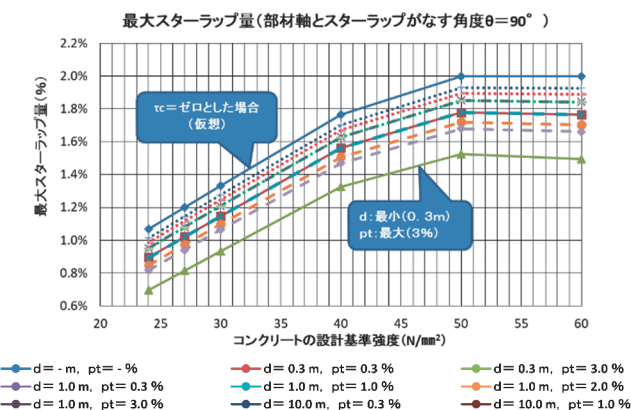


図-2 ウェブ圧壊耐力から算出されるせん断補強鉄筋量

4. 推定式の確からしさの評価

4.1 一般化した斜め引張破壊に対するせん断耐力

修正トラス理論による斜め引張破壊に対するせん断耐力 S_u は、せん断補強鉄筋が負担するせん断力を S_s として、

$$S_u = S_c + S_s \dots\dots\dots \text{式(6)}$$

とあらわすことができる。本研究では、この式における S_c について、一般化された式(4)を用いることとした。以下では、式(6)で表されるせん断耐力について、既往のせん断載荷実験結果⁴⁾との比較を行い、推定式の平均値及び偏差について評価した結果を示す。なお、式(4)におけるコンクリートが負担する平均せん断応力度は、前述のとおり下限値相当の値(2.3%の確率で下回らない値)であることから、式(6)で表されるせん断耐力も下限値に近い値を示すことになる。そこで、式(6)のバイアス(平均値からの偏り。偏りがない場合、データの平均値と推定式の値が一致する)を評価したうえで、そのバイアスを補正する係数を用いて式(6)を平均式に補正することを行った。その後、平均式に補正された式(6)を用いて、軸方向力の影響がある場合など、様々なケースにおける推定精度(平均値、偏差)について評価を行った。

4.2 推定式の確からしさの結果

はじめに、軸方向力等の影響がなく、せん断補強鉄筋を有する場合のはりのせん断耐力の実験値(219体)に対して、式(6)との比較を行った。供試体の条件等は文献2)を参照のこと。その結果(実験値と計算値との比)を図-3に示す。

図より、バイアス1.299、標準偏差0.270、変動係数0.208であることがわかる。これより、式(6)を平均式へ変換する補正係数を1.3と定めて、改めてせん断補強鉄筋の有無やプレストレスの有無に対して精度の確認を行った。その結果を表-1に示す。なお、この表における各ケースのバイアス

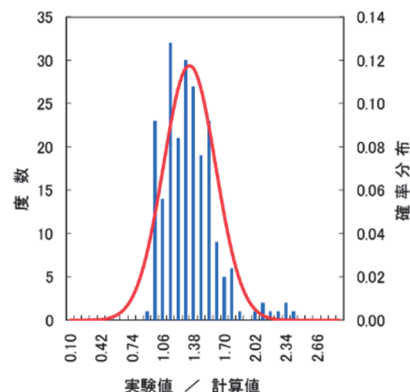


図-3 式(6)を用いた場合の $S_c + S_s$ のばらつき

は、平均式で評価した場合の偏りを示している。これより、1.3で補正して平均式とした式(6)による評価では、すべての場合で安全側に評価できること、および実験値と計算値との比については、5%フラクタイル値（その値を下回る確率が5%である値）が少なくとも0.65~0.85程度となることがわかった。なお、表中にあるPC鋼材曲げ上げ有のデータについては、データ数が9体と少ないこと、また全てのデータが上側に偏っていることなどから、ここでは参考値としている。

表-1 式(6)の確からしさ（実験値/計算値）

条件	バイアス	変動係数	5%フラクタイル	母数	
R C 構造	せん断補強鉄筋無	1.053	0.132	0.825	60
	せん断補強鉄筋有	0.999*1	0.208	0.658	219
P C 構造	せん断補強鉄筋有	1.157	0.192	0.793	17
	せん断補強鉄筋無	1.413	0.259	0.813	43
	PC鋼材曲げ上げ有	1.110*2	0.263*2	0.631*2	9

*1 : 0.999=1.299/1.3、*2 : 参考値

5. まとめ

本研究による結論を以下に示す。

- 1) 斜め引張破壊に対するせん断耐力で考慮されるコンクリートが負担するせん断力について、寸法効果や軸方向鉄筋比による効果を考慮した推定式を基本として、プレストレスなどの軸方向力の効果を適切に補正した部材の種類によらない評価式を提案した。

- 2) 一般化したせん断耐力式に対し、トラス理論の成立要件、コンクリートが負担するせん断力の範囲、せん断補強鉄筋が負担するせん断力の範囲を明らかにした。
- 3) 一般化した推定式の推定精度（平均値、偏差等）について、軸方向力の影響がなく、せん断補強鉄筋を入れた場合のほりに対する実験値との比較を行った結果、実験値/計算値は変動係数として20%程度、バイアスが1.3程度となった。
- 4) 補正係数1.3により推定式を平均式に変換したのち、様々な場合の推定精度を検証した結果、実験値/計算値の5%フラクタイル値は最低でも0.65~0.85程度となることが明らかとなった。

平成29年の道示改定にあたっては、以上の研究成果を踏まえた検討が行われ、せん断耐力に関する部分係数などが規定されている。今後は、既設構造物の耐荷力評価も視野に入れ、耐荷力評価に関する基礎研究を継続していく予定である。

参考文献

- 1) F.レオンハルトほか：鉄筋コンクリートの設計、鹿島出版会、1986
- 2) 林ほか：コンクリートはりのせん断耐荷力に関する研究、土木研究所資料第4373号、2018
- 3) 檜貝勇：鉄筋コンクリート部材の諸性状（その5）—アメリカにおけるせん断の研究—、コンクリートライブラリー第34号鉄筋コンクリート終局強度理論の参考、土木学会、p.33、1972
- 4) 鈴木基行、姜錫和、尾坂芳夫：せん断補強筋を有する鉄筋コンクリートばりのせん断耐力評価に関する解析的研究、土木学会論文集第426号、pp.111~120、1991
- 5) 渡辺ほか：コンクリート構造物の設計に関する国際標準導入による影響とその対応、独立行政法人土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム、土木研究所資料第4044号、2007

大島義信



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
Yoshinobu OSHIMA

林 克弘



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員、現 (株)オリエンタルコンサルタンツ 副主幹
Katsuhiko HAYASHI

高瀬 弘



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員
Hiroshi TAKASE

石田雅博



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 首席研究員
Masahiro ISHIDA