

[討議・回答]

崔 益暢
鈴木顯彰 共著
三島徹也
二羽淳一郎

“鉄筋およびFRPロッドを補強材としたコンクリートはりのせん断耐荷性状に関する研究”への討議・回答

(土木学会論文集 No. 557/V-34 1997年2月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

上田多門 (北海道大学)

Tamon UEDA

最近になって、はりのせん断耐荷機構に関する解析的な研究が行われ^{1), 2)}、耐荷機構の解明、せん断耐力の合理的な推定に少なからぬ貢献をしている。これらの研究の背景には、連続繊維補強材のコンクリート用補強材としての適用があると考えられる。連続繊維補強材は、鋼材と比較すると、弾性係数の大きさが大きく異なる。降伏現象を持たないといった具合に、その力学的性状が大きく異なり、実験式である従来のせん断耐力推定式が適用できないという問題が生じたからである。本論文で適用されている格子モデル³⁾に関する一連の研究も、それらいくつかの研究の一つである。

他のはりのせん断耐荷機構に関するモデルと比較した場合、本論文のはりの格子モデルの特徴は、次の2点に集約されよう。

- ① コンクリートのひび割れでの力の伝達現象を考慮していない。別な言い方をすれば、圧縮斜材の角度を45度に固定したモデルとなっている。
- ② せん断抵抗要素であるウェブ部のコンクリートを、内部のアーチ部材と外部の圧縮部材とに分けている。

コンクリートのせん断ひび割れでの力の伝達は、ひび割れ方向のせん断力と、ひび割れ直角方向の圧縮力に対し行われる。この伝達されるせん断力と圧縮力の比率は、はりの作用せん断力の大きさとともに変化し、いわゆるウェブコンクリートの斜め圧縮力方向の変化、もしくは、せん断ひび割れの角度の変化として現れる。従って、せん断耐力時とそれに至る途中の段階ではウェブコンクリートの圧縮力の角度は異なるし、また、せん断補強筋比、軸補強筋比によっても変わりうる。このような事実は、格子モデルにおいては、載荷点と支点とを結ぶアーチ部分と傾きが45度の斜材部分との負担割合の変化として、表現されているとも考えられる。しかし、実際の現象であるひび割れでの力の伝達を無視している事実に対する合理的な説明がなければ、たまたま、実際の現象と合ってしまったと言われかねない。また、せん断ひび割れでの伝達能力の限界によるはりのせん断破壊現

象が表現できない点も、見落とされてはならない点であろう。

せん断ひび割れ発生後、内部にあるアーチ部の圧縮力が、外部にある斜材部の圧縮力に比較し、急増するとしているが、実験事実としている図-22, 23では、まだ、そう結論するには十分なデータとは言えないのではないかであろうか。つまり、内部と外部の歪みの増加の程度に誰もが認める顕著な差は見て取れない。測定方法による差異（例えば測定長の差異）なども十分に検討されたのであろうか。表面での主歪み方向は45度でないと記述されているが、内部の歪み方向と近かったのではないであろうか。アーチ部と斜材部という抵抗機構の差と言うより、一般的な現象として、内部の方がコンクリートの歪みが大きいと言う事実があるのではないか。などなど、検討の余地はまだ残されているように感じられる。いわゆるトラス的な抵抗機構とそれ以外のアーチ的な機構とが存在すると言う点に異論を挟むものではないが、二つの抵抗要素が内部と外部とにあるとする結論は、もう少し詳細な検討を重ねた上で出されるべきであろう。

以上、類似の研究をしている立場から、疑問と言ふ形で討議を起こした。この種の研究を行っている読者に何らかの有用な情報があるとすれば幸いである。

参考文献

- 1) 中村光、檜貝勇：拡張した修正圧縮場理論によるRCはり断面のせん断耐力評価、土木学会論文集、No. 490/V-23, pp. 157-166, 1994年5月。
- 2) 佐藤靖彦、上田多門、角田與史雄：せん断補強筋を有する鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリートはりのせん断耐力、土木学会論文集、No. 544/V-32, pp. 43-52, 1996年8月。
- 3) 二羽淳一郎、崔益暢、田辺忠顯：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究、土木学会論文集、No. 508/V-26, pp. 79-88, 1995年2月。

(1997.8.20受付)

1. はじめに

私共の論文に対する上田多門氏からの討議に対して、著者を代表して回答致します。

2. 研究の背景について

コンクリート構造のせん断耐荷機構に関する最近の解析的な研究の背景として、上田氏は連続繊維補強材のコンクリート用補強材としての適用を挙げておられるが、これは理由の一つではあっても全てではない。従来、コンクリート棒部材のせん断耐荷機構に関しては、修正トラス理論が適用されてきたことは周知の通りである。部材のせん断耐荷力をコンクリート貢献分とせん断補強筋の貢献分に区分し、これらの和としてせん断耐荷力を求める修正トラス理論の考え方方は広く浸透し、実務的に幅広く普及している。しかしながら、変形の適合条件を考えることなく、コンクリート貢献分とせん断補強筋の貢献分を加算していることには、合理的な説明がなされていなかった。また、コンクリート貢献分が、上田氏の指摘するようなせん断ひび割れ面での抵抗機構から決まるものだとすれば、部材の変形あるいはこれに伴うせん断ひび割れ幅の増加によりこれが減少していくと考えるのが自然であり、斜めひび割れの発生から終局状態に至るまで、何故コンクリート貢献分が一定値を保つか（あるいは保つと考えて良いのか）についても、何等、合理的な説明がなかった。実際、Collins らの研究¹⁾では、コンクリート貢献分は、せん断ひび割れに直交する方向の平均ひずみの増加に伴い、減少する形で定式化されている。

コンクリート棒部材のせん断耐荷機構を解析的に取り扱いたいという欲求は、大学でコンクリート構造の講義を担当される方なら良く理解できると思う。自分自身、修正トラス理論の項になると疑問を感じつつ講義を行ってきた。このような一連の問題を解決するための突破口として、われわれが提案したのが「格子モデル」による解析法である^{2)~5)}。したがって、これはあくまでもせん断問題に対する解析的研究のためのツールであり、単に連続繊維補強材をコンクリート用補強材として適用していくために提案しているものではない。

3. 格子モデルの特徴について

格子モデルの特徴として、上田氏は、(1) コンクリートのひび割れでの力の伝達を考慮せず、圧縮斜材を 45

度に固定したモデルであることと、(2) ウェブ部のコンクリートを内部のアーチ部材と外部の圧縮斜材に分けていることを挙げている。ただ、これだけでは「格子モデル」の説明としては不十分ではないかと思う。

格子モデルは、2. でも述べたようにせん断問題を解析的に取り扱うためのツールとしてわれわれが開発し、提案してきたものである。その根底には、変形の適合条件を満たしつつ、実現象ができるだけ簡単にモデル化していこうという意図がある。

せん断問題に対して、変形の適合条件を満足させる解析を行うためには、有限要素法などの数値解析手法を用いざるを得ない。有限要素法では、問題となる個々のケースに対する解は得られるし、それで十分であるとも考えられるが、その結果を抽出して一般性を引き出し、実現象を解明していくにはあまりにも情報量が多すぎて処理していくのが煩雑である。また、このような後処理のプロセスにおいて客観性が失われることもある。したがって、せん断耐荷機構を解明していくには、より簡易で、しかも客観的な後処理が可能な解析手法が望ましいと考えた訳である。

コンクリート棒部材のせん断問題で、耐荷機構をトラスとアーチに分けていく考え方は、建築学会でも行われているが、平面応力場の中にトラスとアーチを併存させたのでは、ウェブコンクリートの抵抗機構を二重にカウントすることになり、不適切であると考える。したがって、平面骨組解析ではあるが、端部節点以外では変形を独立させたアーチ部材を骨組内部に配置することにより、この問題を解決することにした。このように格子モデルは 2 次元モデルでありながら、厚さ方向の 3 次元的な挙動を考慮できる点がセールスポイントであるとわれわれは考えている。圧縮斜材を 45 度に固定したモデルではないかとの指摘に対しては、解析上の一般性を失わないように、格子モデル中には、45 度と 135 度のコンクリートの圧縮斜材と引張斜材を規則的に配置した上で、さらにアーチ部材を配置しており、これら諸部材の組み合わせにより、せん断補強材降伏以後のマクロ的（平均的）な圧縮斜材角の変化にも対応できるので、「圧縮斜材角を 45 度に固定したモデル」などの指摘はあたらないものと考える。

なお、格子モデルの構成要素は全て、軸力のみを受ける「トラス要素」であり、したがって「格子モデル」という呼称は不適切ではないかとの指摘を過去に受けたことがあるが、「トラスモデル」では従来のトラス理論と類似の名称でかえって誤解を招きやすいと考えたため、このように呼ぶことにしている。

構成要素（例えば圧縮斜材や引張斜材）が軸方向力に抵抗するだけで、せん断力に抵抗しないとしている点も問題であるとの指摘があるが、せん断補強のないコンクリート棒部材に対する解析結果からみて、引張斜材にコンクリートの引張軟化特性を組み込んでやれば、せん断強度の寸法効果もほぼ妥当に評価できているので、このような簡単なモデル化でも、要点を押さえておけば、それほど大きな問題はないものと考えている。

ちなみに、せん断補強のあるコンクリート棒部材において、斜めひび割れの発生以後、引張斜材の抵抗力は次第に減少していくので、コンクリート貢献分がすべて引張斜材の抵抗力から生じると考えると、修正トラス理論の基本仮定である、コンクリート貢献分が一定値を保つことの説明はできない。しかし、アーチ部材の圧縮力が増加し、引張斜材の抵抗力の減少分を補っていくので、結果として、ほぼ一定のコンクリート貢献分が保持されていくというのが、格子モデル解析による知見である。

4. トラス機構とアーチ機構について

論文中の図-22、図-23に示した、ウェブ内部のコンクリートとコンクリートはり表面でのひずみの測定値、ならびに格子モデルによる解析結果は、格子モデルの基本仮定である、アーチ機構とトラス機構の重ね合わせの妥当性を裏付けるものであるとのわれわれの主張に対して、上田氏は、図では解析値と実験値の対応が明確でなく、またウェブ内部とはり表面でのひずみの相違も明確ではないので、このように述べることは主観的にすぎるのではないかと指摘されている。

格子モデルにおけるトラス機構はせん断補強材と圧縮斜材、引張斜材、上弦材、下弦材から構成されており、せん断補強材との位置関係から、これらは部材の外周部に存在すると仮定している。一方、アーチ部材は、外周部を除いた内部に存在していると仮定している。トラスを構成するコンクリート斜材の幅とアーチの幅は、ボテンシャルエネルギー最小の原理から定めている。

コンクリートはりの立体破壊面に関する市之瀬らの研究⁶⁾では、はりの耐荷挙動を平面応力状態として捉えることが不適切な場合があることを示唆しているが、これは格子モデルの仮定の妥当性を裏付けるものと言える。

鉄筋コンクリートはりに対する解析および実測結果を示す図-22によれば、アーチ部材ひずみの解析結果、ならびに内部コンクリートひずみの実測結果は、斜めひび割れの発生以後、いずれも急激な増加を示しており、格子モデルの仮定の妥当性を裏付けている。ただし、補強材にFRPロッドを用いたはりに対する結果を示す図-23では、上田氏の指摘されるように、あまり明確な傾向は認められないが、この点は補強材の剛性の影響による

ものではないかと思われる。

5. おわりに

コンクリート棒部材のせん断耐荷機構を説明する簡易な解析モデルとして「格子モデル」を開発・提案し、一連の研究により、せん断耐荷機構に関する解析的な知見を得た。格子モデルは使用される材料に依存した解析モデルではなく、したがって鉄筋コンクリート部材はもとより、連続繊維補強材を用いたコンクリート部材にも適用していくことが可能である。

今回の上田氏の討議により、あらためて、格子モデル開発の背景から、その特徴まで、説明する機会を得たことに感謝致します。

参考文献

- 1) Collins, M. P., Mitchell, D., Adebar, P. and Vecchio, F. J.: A General Shear Design Method, ACI Structural Journal, pp. 36-45, January-February 1996.
- 2) Niwa, J., Choi, I. K. and Tanabe, T.: Analytical Study for Shear Resisting Mechanism Using Lattice Model, Proceedings of JCI International Workshop on Shear in Concrete Structures, pp. 146-158, 1994. 6.
- 3) 二羽淳一郎, 崔 益暢, 田辺忠頼: 鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究, 土木学会論文集, No. 508/V-26, pp. 79-88, 1995. 2.
- 4) 二羽淳一郎, 崔 益暢, 三島徹也, 鈴木顕彰: 格子モデルによるFRP補強コンクリートはりのせん断耐荷力の定量的評価, 土木学会論文集, No. 538/V-31, pp. 105-114, 1996. 5.
- 5) Niwa, J.: Lattice Model with Concrete Tension Members for Shear Resisting Mechanisms of Concrete Beams, Concrete Tension and Size Effects, CEB Bulletin d'Information No. 237, pp. 159-170, 1997. 4.
- 6) 半谷公司, 市之瀬敏勝: RC梁のせん断破壊実験による立体破壊面の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp. 545-550, 1994. 6.

(1998. 3. 9 受付)