

論文 コンクリートはりのせん断破壊現象の数値解析的評価

菅沼孝幸*1・二羽淳一郎*2・田辺忠顕*3

要旨：格子モデルを用いて、せん断補強されたコンクリートはりのモデル化を行い、コンクリートのせん断破壊がどの部材に起因するのかを、せん断補強筋の量を変化させることにより検討した。その際に各部材の応力-ひずみ関係に着目することとした。解析の結果、せん断補強筋量の増加はせん断耐荷力には大きく貢献するが、どの時点で耐荷力がピークを迎えるかという点に関しては、最終的にアーチ機構に大きく依存していることが示された。

キーワード：格子モデル、せん断耐荷力、せん断補強筋、アーチ機構

1. はじめに

本研究では、せん断補強されたコンクリートはりのせん断破壊現象を対象として、格子モデル[1,2]を適用し、鉄筋コンクリートはりのせん断破壊を数値解析的に評価する。シミュレーションの方法としては、せん断補強筋の量を変化させる。そして、モデル化されたはり中の各部材の応力-ひずみ関係に着目することにより、せん断補強されたはりが破壊に至るまでに、どの部材が降伏あるいは軟化し、また除荷するかを調べる。それにより、どの部材の降伏あるいは軟化によってせん断破壊が引き起こされるのかを数値解析的に明らかにする。

2. 解析方法

2.1 格子モデルの概要

せん断補強されたはりのモデル化にあたっては、図-1のような格子モデルを用いた。これは、連続体である鉄筋コンクリート部材を、トラス要素の集合体に置き換えたものである。

コンクリートは、曲げ圧縮部材、曲げ引張部材、斜め圧縮部材、斜め引張部材、アーチ部材に、補強材は軸方向部材と横方向部材にモデル化される。図中の太い実線はアーチ部材を表している。トラスの斜材角は45度と固定しているが、アーチ部材を考えることにより、せん断補強筋降伏以後の応力の再分配を表現することができる。横方向部材の水平方向間隔は水平部材間距離の1/2としている。

各部材の面積の求め方に関して、図-2のような格子モデルの軸直角方向断面の概念図を考える。コンクリートの曲げ引張部材に対しては、かぶりの2倍の厚さをとり、曲げ圧縮部材に対しては、有効高さ d の1/8倍とした。アーチ部材に関しては、まず、載荷点と支持点において軸方向に幅 d の長さを考え、これによってできる帯の幅をその厚さとした。また、配置間隔 $d/2$ のトラスの斜材については、その幅を $d/2\sin(\pi/2)$ とした。

また、ウェブコンクリートで図-2のようにハッチした部分をアーチに、残りをトラスの斜材と

*1 名古屋大学大学院 工学研究科地圏環境工学専攻(正会員)

*2 名古屋大学助教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

*3 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

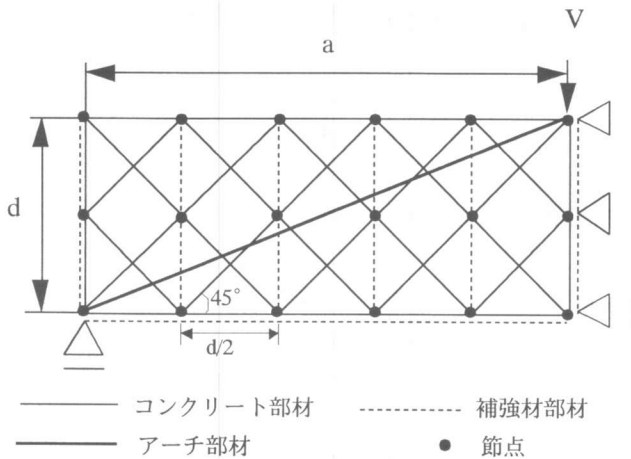


図-1 格子モデルの概念図

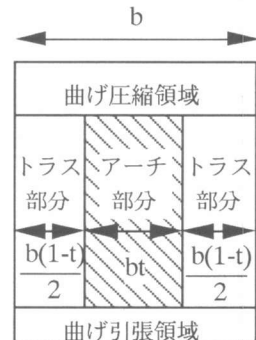


図-2 格子モデルの断面

して、アーチ部分の占める割合を t とした。この比率 t の決定にあつては、仮定した t に対して弾性解析により各部材のひずみエネルギーをあらかじめ計算しておき、部材全体としてのポテンシャルエネルギーが最小となるように決定した。

格子モデルに用いた各部材の応力-ひずみ関係を以下に示す。

1) コンクリート引張部材

コンクリートの引張部材においては、引張強度到達以後は引張軟化曲線を適用することとした。使用した軟化曲線は1/4モデルで、破壊エネルギーは $G_f=0.1\text{kgf/cm}$ とした。

2) コンクリート圧縮部材およびアーチ部材

コンクリート圧縮部材とアーチ部材においては圧縮軟化を考慮し、Collinsらのモデルを適用した。

3) セン断補強材

せん断補強材は、降伏強度以後、弾性係数の1/100の勾配をとるようなバイリニアモデルとした。

4) 主鉄筋

主鉄筋は、弾性体とした。

2.2 格子モデルの構成

前述した格子モデルを用い、4つのケースでシミュレーションを行う。解析に用いるのは中央1点荷重の単純はりで、その諸元は、はり幅 $b=20.3\text{cm}$ 、有効高さ $d=38.9\text{cm}$ 、せん断スパン $a=97.3\text{cm}$ 、コンクリート圧縮強度 $f_c=252\text{kgf/cm}^2$ 、コンクリート引張強度 $f_t=23.0\text{kgf/cm}^2$ 、主筋とせん断補強筋の弾性係数 $E_s=E_w=2.04 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$ 、主筋の断面積 $A_s=24.5\text{cm}^2$ 、せん断補強筋の降伏強度 $f_{wy}=3380\text{kgf/cm}^2$ 、としせん断補強筋比 r_w のみを0.05、0.15、0.38、1.0%と変化させる。このデータ中の $r_w=100A_w/(bs)=0.38\%$ のはりはClark[3]の実験に用いられた供試体を格子モデルによりモデル化したものである。解析の目的は、せん断補強筋比の変化により、せん断破壊がどの部材の降伏あるいは軟化により支配されるものかを明らかにすることにある。本研究では、

Clarkの実験供試体を念頭において、せん断スパン比 a/d を2.5に固定した。また、スターラップ間隔については、格子モデルにおいて有効高さの1/2と固定しているため、スターラップの面積を変えることによりせん断補強筋比を一致させた。

格子モデルを構成するにあたり、アーチ部材とトラスの引張、圧縮斜材の比率 t は前述の通りポテンシャルエネルギーが最小になるように決定している。その結果を表-1に示す。

以上のようにして構成した格子モデルを用い、変位制御により増分解析を行った。なお、収束計算にはNewton-Raphson法を用い、収束判定条件は、非線形解析において発生する不釣合力の合計が、作用せん断力の1%以下になるものとした。

表-1 せん断補強筋比と t 値の関係

| | | | | |
|-------|------|------|------|-----|
| rw(%) | 0.05 | 0.15 | 0.38 | 1.0 |
| t 値 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |

3. 解析結果

格子モデルを用いて解析を行い、得られた荷重点変位-せん断力関係を図-3、4、5、6に示す。これらの図には、どの時点でどの部材が降伏しているかがわかるよう、降伏あるいは軟化に至った部材には図-7に対応した部材番号を書き加えた。

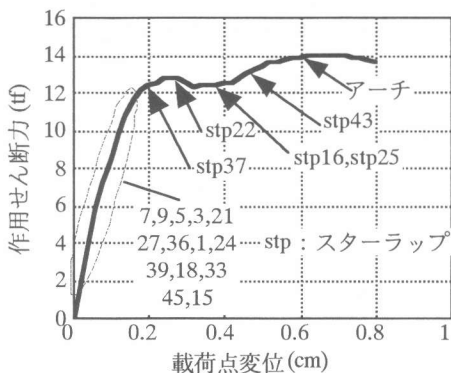


図-3 $r_w=0.05\%$ における部材の降伏状況

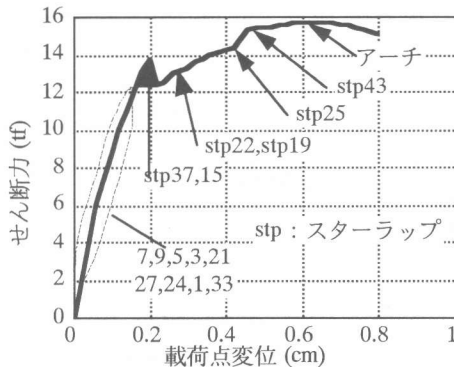


図-4 $r_w=0.15\%$ における部材の降伏状況

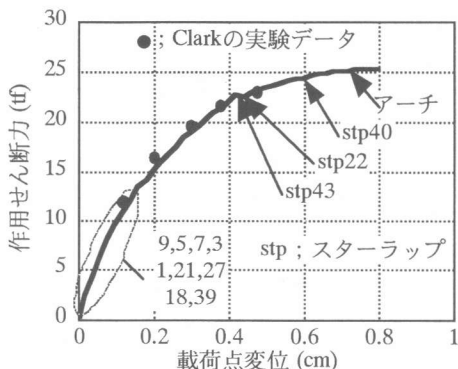


図-5 $r_w=0.38\%$ における部材の降伏状況

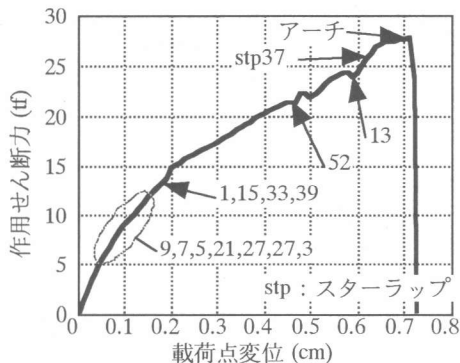


図-6 $r_w=1\%$ における部材の降伏状況

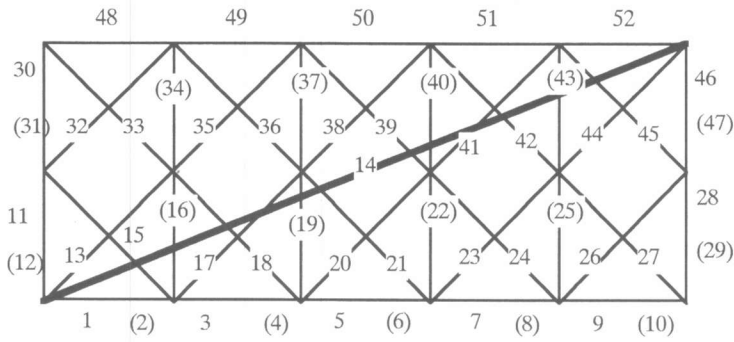


図-7 解析供試体の部材番号

注) () は補強材

全体として、これらの図からわかることは、スターラップ量が少なくなるほど、作用せん断力-載荷点変位関係には第一のピークと第二のピークが顕著に現れることである。この第一のピークの存在は、スターラップの降伏の影響が大きいと考えられる。

せん断補強筋比 r_w が0.05、0.15、0.38%の場合に、第一のピークにおいて各部材の応力-ひずみ関係に着目すると、せん断抵抗力が減少するピーク直後には、スターラップの降伏が起きていることがわかった。それに加えて、このピーク付近では降伏強度に達していない多くの圧縮斜材、引張斜材などに除荷(unloading)が起こるとともに、逆にアーチ部材や降伏に至っていない他のス

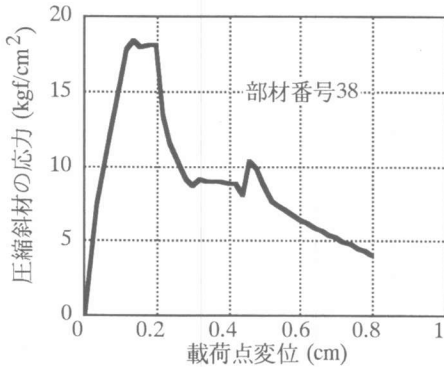


図-8 載荷点変位量に伴う応力変化

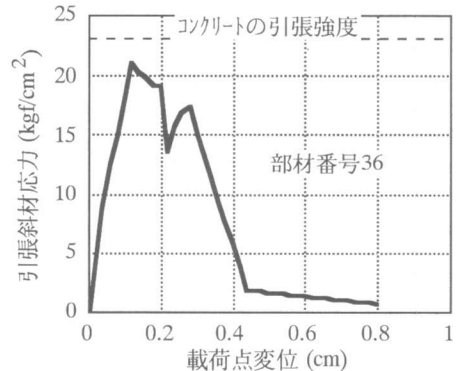


図-9 載荷点変位量に伴う応力の変化

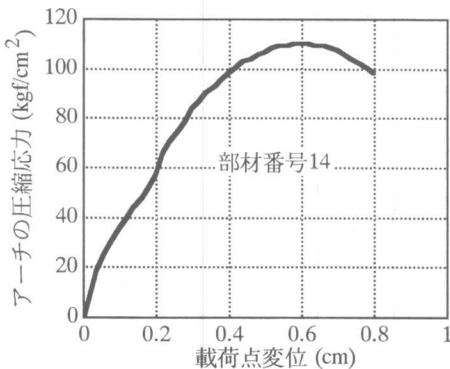


図-10 載荷点変位量に伴う応力の変化

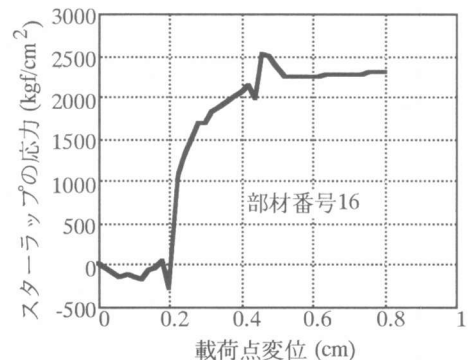


図-11 載荷点変位量に伴う応力の変化

ターラップの負担する力が増加することもわかった。この現象を表す例として、 $r_w=0.15\%$ における荷点変位-部材応力の関係を図-8、9、10、11に示す。ここで図-8、9はunloadingする圧縮部材(部材番号38)、引張部材(部材番号36)の、図10、11は負担力が増加するアーチ部材(部材番号14)とスターラップ(部材番号16)の、荷点変位の増加に伴う部材応力変化を表す。

また、この第一のピーク近辺で接線剛性マトリクスの固有値解析[2]を行うと、負の固有値が出現することが明らかとなった。これはスターラップや引張斜材の軟化によるものと考えられる。図-12に $r_w=0.15\%$ の負の固有値の出現状況を示す。そしてこの第一のピークを過ぎ、再び作用せん断力が増加すると、他のスターラップも降伏し始め、最終的にアーチ部材が圧縮による軟化を起こし、せん断抵抗力は第二のピークを迎える。

以上に述べたような2つのピークが現れない $r_w=1\%$ のほりに関しては、荷点変位の増加に伴い作用せん断力は単調に増加していく。そして、作用せん断力が最大値に近くなると図-13に示すようにコンクリートの圧縮斜材(部材番号13)の軟化が起きることが示された。この時点でアーチの圧縮に対する負担力の増加がみられた。その後、スターラップが降伏し、アーチ部材の圧縮軟化によって、急激に作用せん断力が下降する。なお、このケースにおいても、せん断破壊に至る前に、降伏強度に達していない部材にはunloadingが認められた。固有値解析の結果、スターラップの降伏時に、接線剛性マトリクスが負の固有値を持つが、耐荷力が急激に下降する時点でも負の固有値を持つことがわかった。

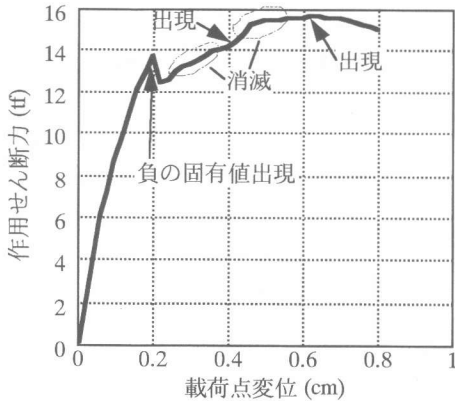


図-12 $r_w=0.15\%$ における部材の降伏状況

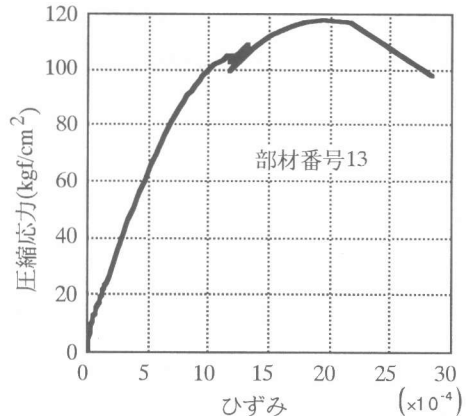


図-13 圧縮斜材の軟化を示す応力-ひずみ関

以上のことから、これらのせん断補強されたはりの評価をまとめると、すべてのケースにおいて、下弦材のコンクリート曲げ引張部材や、コンクリート斜め引張部材は早期に軟化を示すことがわかった。しかし、スターラップ量の増加に伴い、スターラップが引張力を分担するため、軟化に至るコンクリート引張斜材の数が減少する傾向にある。また、スターラップ量の増加に伴い、せん断抵抗力が増加していくためコンクリート圧縮斜材力が大きくなり、 $r_w=1\%$ のモデルでは、アーチ部材の軟化に加えて圧縮斜材の軟化もみられた。

破壊に至るまでの計算過程における収束状況については、すべてのケースにおいて収束回数は10回以内で、負の固有値が出現した際においても、これによる影響はみられなかった。

4. 結論

今回の解析により以下のことが明らかになった。

(1) スターラップの配置されているコンクリートはりにおいては、スターラップの降伏によって、せん断抵抗力が減少し、負の固有値が出現する場合がある。ただし、これははりの破壊を表すものではなく、せん断破壊は、最終的にアーチ部材の圧縮破壊に大きく依存する。

(2) スターラップ量の増加に伴い、せん断抵抗力が増加していくので、圧縮斜材の受ける力が増加し、スターラップ量によっては圧縮斜材の破壊が起きる場合もある。コンクリート引張斜材に関しては、スターラップが引張力を分担するため、軟化する部材数が減る傾向にある。

(3) スターラップ量の増加はせん断耐荷力に大きく貢献するが、どの時点ではりが破壊するかという問題に対しては、あまり影響を及ぼさないと考えられる。

(4) 載荷点変位の増加に伴い作用せん断力は増加していくが、ある時点において降伏強度に達していない部材、特にコンクリート圧縮斜材や引張斜材においてはunloadingが起こる。

参考文献

- [1] 崔 益暢・二羽淳一郎：格子モデルによるRCはりのせん断性状の解析的評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.2, pp.563-568, 1994.6
- [2] 二羽淳一郎・崔 益暢・田辺忠顕：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
- [3] Clark, A.P. : Diagonal Tension in Reinforced Concrete Beams, ACI J., :pp145~156, 1951
- [4] 田辺忠顕・檜貝 勇・梅原秀哲・二羽淳一郎:コンクリート構造、朝倉書店、1992