

論文

[2093] 格子モデルによる RC はりのせん断性状の解析的評価

崔 益暢^{*1}・二羽淳一郎^{*2}

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材のせん断耐荷機構に関する研究は近年もなお精力的に行われている。トラス理論系や塑性理論系のマクロモデルによる耐荷機構の提案、非線形の有限要素法を適用した数値解析手法、設計への適用を念頭においたストラット-タイモデル等、数多くの考え方が提案されてきており、各種の設計コードに反映されている。また、せん断補強のない場合に対しては、実験式の提案や破壊力学の適用も行われてきている。現在、土木学会のコンクリート標準示方書には、せん断補強された鉄筋コンクリート棒部材のせん断耐荷力の算定方法として、修正トラス理論に基づく設計方法が規定されている。この方法は既往の実績に裏付けられており、半理論式ではあるが、適用範囲を逸脱しなければ、妥当なものであると判断されている。

しかしながら、連続繊維補強材の出現は、この状況に大いなる問題点を投げかけている。すなわち、弾性状態から直ちに破断に至り、塑性状態を示さない連続繊維補強材に対しては、せん断補強筋の降伏時耐力 V_s とコンクリート貢献分 V_c を重ね合わせる修正トラス理論の考え方がそのままでは適用できないのである。どのような補強材を用いた場合でも統一的に適用可能な設計耐荷力の算定方法を規定する前提として、現象を適切に表現しうる耐荷機構モデルを提示することが求められている。

このための一つの方法は有限要素法によるものである。佐藤らは、非線形FEMの計算結果に基づき、コンクリートとせん断補強筋のせん断力の分担率の変化、補強筋の剛性変化の影響等を詳細に検討した結果を報告している[1]。しかしながら、連続体としてモデル化したコンクリート中の力の流れを離散的に処理して、耐荷機構モデルに結びつけていくことにはかなりの困難を伴うものと予想される。

Schlaichらの提案するストラット-タイモデルは、支点付近やディープビーム等の不連続領域の設計に適用することを念頭に置いたものであるが、部材をストラットとタイに離散化しているので、力の流れが限定され、取り扱いが容易である[2]。

以上を勘案し、本研究では、処理が容易で、現象を明快に説明するという要件を満たすものとして、コンクリート部材を格子状のトラスの集合体にモデル化する手法を検討した。

2. 格子モデルの概要

2.1 解析の目的

本研究は、せん断補強されたコンクリートはりのひびわれ発生、せん断補強材の降伏、コンクリートの破壊に至るまでの一連の耐荷機構の変化を明らかにすることを目的としている。補強材としては鋼材の他、連続繊維補強材を想定した弾性-脆性破壊材料も含めている。

*1 名古屋大学大学院 土木工学専攻、工修（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）

斜めひびわれ発生以後の変形の増大に伴うはり内部での力の分担の変化、最終的な破壊形態、せん断耐荷力等を解析的に評価していく。

2.2 格子モデル

図-1(a)は斜めひびわれの発生したコンクリートはりの模式図である。図中に示す斜めひびわれと平行な微小要素において、ひびわれ面に沿うせん断応力を無視すると、この要素には2軸の圧縮-引張応力が作用することになる(図-1(b))。

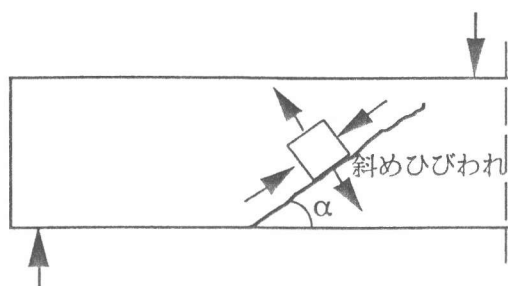


図-1(a) 斜めひびわれの発生したコンクリートはり

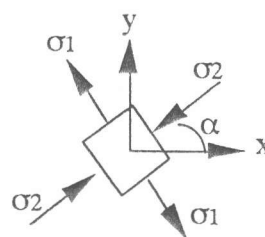


図-1(b) はり中の微小コンクリート要素

図-1(b)のようなコンクリート要素の応力状態を表すために、図-2のような格子モデルを設定した。すなわち、連続体である鉄筋コンクリート部材をトラスの集合体に置き換えたものであ

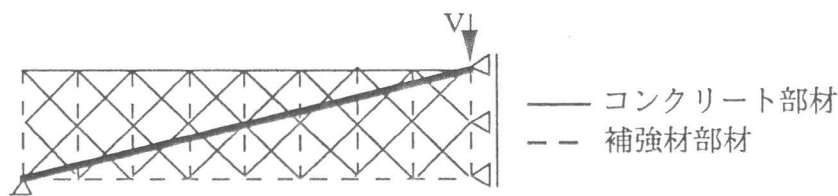


図-2 格子モデルの概念図

る。コンクリートは、曲げ圧縮部材、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。各部材に対して後述する非線形の応力-ひずみ関係を与えて、変位制御で増分解析を行った。

図-3は格子モデルの軸直角方向断面の概念図である。

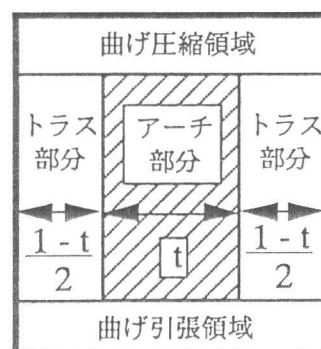


図-3 格子モデルの断面

ウェブコンクリートを図-3のようにコンクリートのトラス部分(圧縮および引張)とアーチ部材に区分した。ハッチした部分をアーチに残りをトラスの斜材部分とした。アーチ部分の幅が占める割合を t とした。この比率 t の決定に当たっては、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、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。ひびわれ発生前後でポテンシャルエネルギーの値は変化するが、ここではあくまでも第一近似として、この手法を用いている。 t の変化に伴うポテンシャルエネルギーの変化の状態の一例を図-4に示す。この場合は、 $t = 0.6$ と設定することとなる。

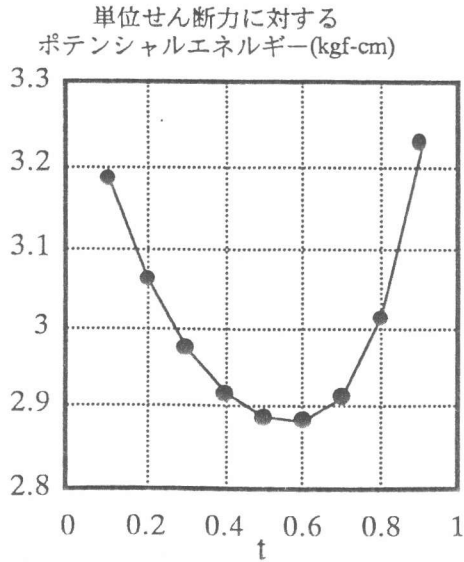


図-4 tに伴うポテンシャルエネルギーの変化

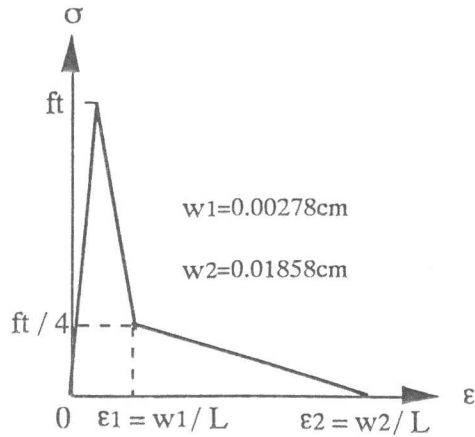


図-5 コンクリートの引張軟化曲線

2.3 各部材の応力-ひずみ関係

(1) コンクリート引張斜材

コンクリートの引張斜材は、せん断力から生じる主引張応力に抵抗するものであるが、ひびわれ発生以後は軟化していく。したがって、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図-5に示す1/4モデルに基づくもので、破壊エネルギーは $G_F=0.1 \text{ kgf/cm}$ とした。図中の L は引張斜材の長さであり、軟化曲線におけるひびわれ幅を L で除すことによりひずみに変換している。

(2) コンクリート圧縮斜材およびアーチ部材

コンクリート圧縮斜材とアーチ部材は共同して斜め圧縮力に抵抗する。斜めひびわれ発生以後のコンクリートの圧縮軟化特性については、Collinsらのモデルと軟化係数を用いた[3]。軟化係数 η の評価に用いる直交方向のひずみ ϵ_t には当該の圧縮斜材と直交する引張斜材のひずみを用いることとした。使用したコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係は式(1)の通りである。

$$\sigma' = -\eta f_c' \left[2 \left(\frac{\epsilon_t'}{\epsilon_0'} \right) - \left(\frac{\epsilon_t'}{\epsilon_0'} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ただし、
$$\eta = \frac{1}{0.8 - 0.34 (\epsilon_t' / \epsilon_0')} \leq 1.0$$

(3) 水平および垂直部材

水平および垂直部材を形成する補強材の応力-ひずみ関係は、鋼材の場合は完全弾塑性とし、連続繊維補強材の場合は、弾性-脆性破壊とした。曲げ引張側の水平部材の厚さは、引張補強材の中心からはり下面までの距離の2倍とした。この部分に含まれるコンクリートには付着の効果 considering 岡村らの提案によるテンションスティフニングモデルを適用している。なお、曲げ圧縮側については部材厚さを曲げ引張側と同一とし、コンクリートについては圧縮軟化を考慮していない。以上の応力-ひずみ関係を用いて、数値計算を実行した。

表-1 解析した各種はりの諸元

ID	種類	b cm	h cm	d cm	a/d	fc' kgf/cm ²	As cm ²	Es kgf/cm ²	fy kgf/cm ²	Aw cm ²	Ew kgf/cm ²	fwy kgf/cm ²	s cm	Vmax tf
No.1	RC	20.3	50.8	43.2	2.33	316	23.1	2.1x10 ⁶	5420	0	----	----	---	14.1
No.2	RC	"	"	"	"	"	"	"	"	0.2	2.1x10 ⁶	5420	13.3	24.1
No.3	RC	"	"	"	"	"	"	"	"	0.4	"	"	"	27.1
No.4	RC	"	"	"	"	"	"	"	"	0.71	"	"	"	32.4
No.5	RC	"	"	"	"	"	"	"	"	1.42	"	"	"	39.9
No.6	RC	"	"	"	"	"	"	"	"	2.13	"	"	"	42.5
No.7	RC	"	45.7	38.9	2.0	252	24.5	"	3300	1.5	"	3300	18.4	21.8
No.8	FRP	15.0	28.0	24.0	3.0	300	4.0	9.6x10 ⁵	13000	0.4	5.4x10 ⁵	13000	12.0	8.4
No.9	FRP	"	"	"	"	"	"	"	"	"	7.0x10 ⁵	"	"	10.5
No.10	FRP	"	"	"	"	"	"	"	"	"	9.6x10 ⁵	"	"	10.9
No.11	FRP	"	"	"	"	"	"	"	"	"	1.1x10 ⁶	"	"	12.1

注) FRPのfy, fwyはそれぞれ軸方向、横方向材の破断強度である。

3. 解析結果および考察

3.1 解析の対象

2.で説明した格子モデルを用いて、Ramirezらの実験データ[4]、Arthurの実験データ[5]（いずれもせん断補強されたRCはり）および連続繊維補強材で補強されたはりを想定して、解析を行った。表-1に、解析したはりの諸元を示す。No.1~No.6のRCはりはRamirezらの実験結果（No.5に相当）と比較することを目的としているので、せん断補強筋量以外は、基本的にRamirezのデータと一致させてある。No.7はArthurらの実験データである。No.8~No.11の連続繊維補強材を想定したものは、せん断補強材の剛性を任意に変化させてある。

3.2 RCはりの解析結果

(1) 各部材の応力状態の変化

図-6にNo.3のRCはりの作用せん断力と荷点変位の関係を示し、図-7(a)~(d)にNo.3のはりの各部材の平均応力と荷点変位の関係を示した。

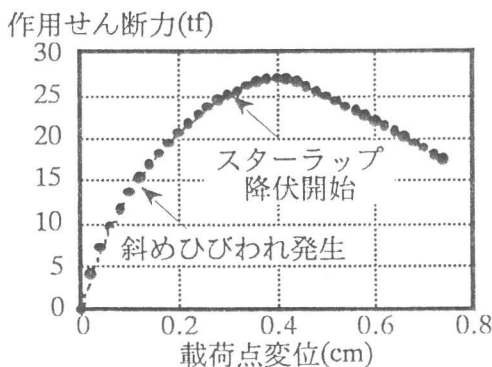


図-6 作用せん断力-荷点変位関係 (No.3)

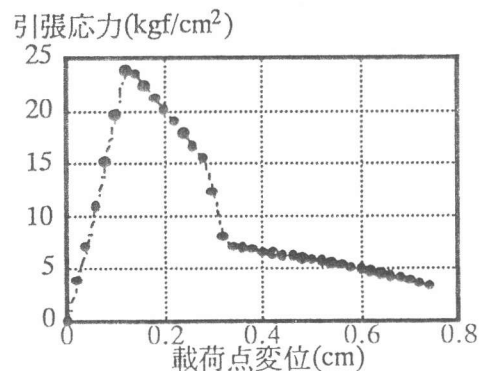


図-7(a) 引張斜材応力-荷点変位関係 (No.3)

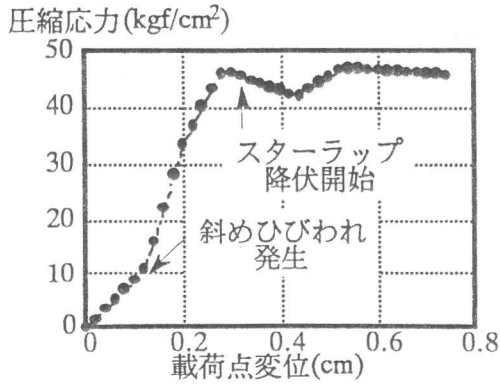


図-7(b) 圧縮斜材応力-荷点変位関係 (No.3)

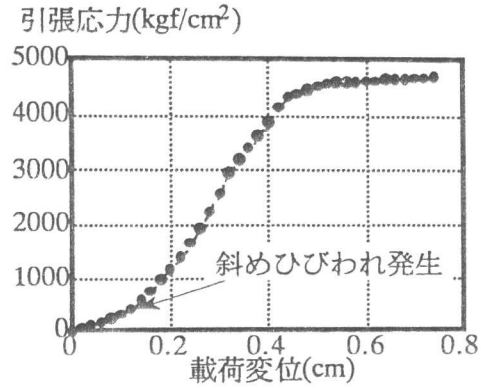


図-7(c) スターラップ応力-荷点変位関係(No.3)

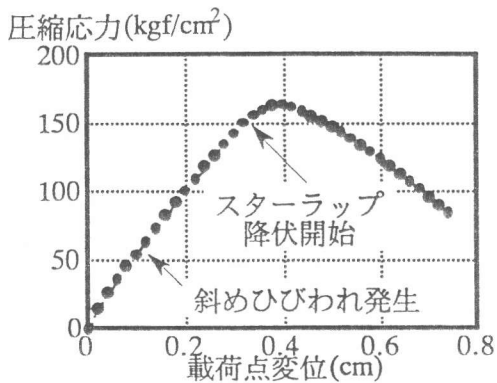


図-7(d) アーチ部材応力-荷点変位関係 (No.3)

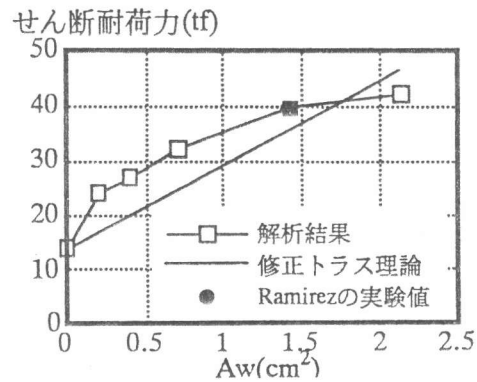


図-8 せん断補強筋量の増加とせん断耐荷力の変化 (No.1~No.6)

図-6に示すように、約15tf (変位0.12cm) で斜めひびわれが発生する。コンクリートの引張斜材の抵抗力はこの後急速に低下していく (図-7(a))。逆に、スターラップの引張応力とコンクリートの圧縮斜材応力はその後急激に増加していく (図-7(b)(c))。ただし、圧縮斜材の応力はある程度の上昇を示した後は安定化する傾向を示した。スターラップは約25tf (変位0.31cm) で降伏しはじめるが、この後も作用せん断力は増加していく。アーチ部材の応力はスターラップの降伏以後も増加

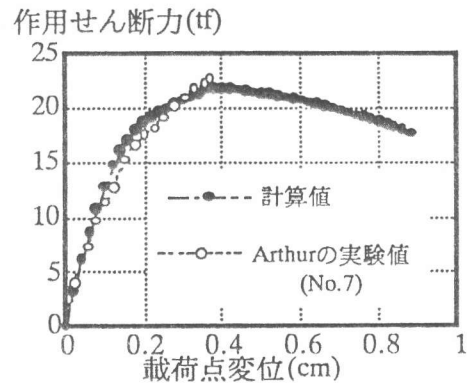


図-9 せん断力-変位関係(No.7)

を示すが、最終的にアーチ部材のコンクリートが圧縮軟化を示すことにより、終局を迎えた (図-7(d))。すなわち、解析的に得られた破壊形態は、スターラップ降伏以後のアーチ部材の圧縮破壊によるせん断破壊である。これはRamirezらの行った実験結果とも一致している。

(2) せん断耐荷力に関する解析結果

図-8はせん断補強筋量の変化に伴うせん断耐荷力の変化を示すものである。図中の●点はRamirezらによる実験値である。また図中の直線は修正トラス理論によるスターラップ降伏時のせん断耐荷力 $V_y = V_c + V_s$ を示している。解析的に得られるせん断耐荷力は修正トラス理論による

V_y よりも大きい場合があり、特にせん断補強筋量が少ないときに顕著である。修正トラス理論による評価は一般に安全側であるが、解析結果によれば、これが実際のせん断耐荷力を表すものではないことが示された。図-9はArthurらが行った実験(No7に相当)と解析におけるせん断力-載荷点変位の関係を示すものであるが、全体的な変位挙動も妥当に評価できることが認められる。

3.3 連続繊維補強材を用いたコンクリー

トはりのせん断耐荷力

図-10は、軸方向、横方向とも、連続繊維補強材を想定した低剛性材料で補強されたコンクリート部材のせん断耐荷力の変化を示すものである。軸方向補強材の剛性は一定とし、せん断補強材の剛性を変化させた。予測された破壊モードは、アーチあるいは圧縮斜材の破壊であって、せん断補強材は破断に至らなかった。この図より、せん断補強材の剛性の低下に伴い、せん断耐荷力が低下していくことが認められる。

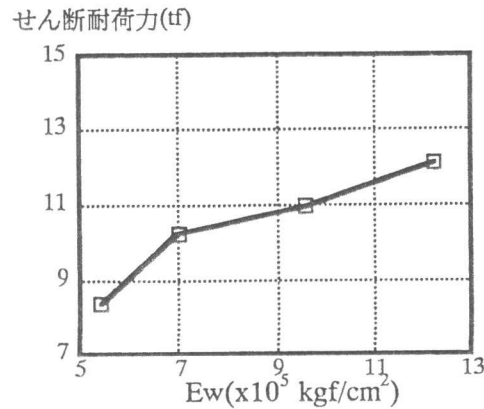


図-10 せん断補強筋の剛性の変化とせん断耐荷力の変化 (No.8~No.11)

なお、破壊時のせん断補強筋の応力は破断強度の35~60%程度であった。連続繊維補強材を用いた場合は、剛性の低さに起因して、RCはりに比較して、同一のせん断応力レベルでのウェブコンクリートの変形が大きくなる。このため、コンクリートの引張斜材は急速に抵抗を失い、また圧縮斜材やアーチの圧縮軟化も加速される。このため、せん断補強材の応力が破断強度に達する以前に、はりとしての破壊に至るものと考えられる。

4. 結論

本研究は、せん断補強されたコンクリート部材を、格子状のトラスとアーチの集合体にモデル化し、材料の非線形性を考慮した増分解析により、部材内部での力の分担を明らかにしたものである。また、せん断補強量の変化や使用する材料の相違により、せん断耐荷力がどのように変化するについても解析的な検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) ここに示した格子モデルは比較的簡単な非線形解析手法であるが、作用せん断力と変位の関係、せん断耐荷力等を妥当に表現することができる。
- (2) 修正トラス理論によるせん断耐荷力の評価は一般には安全側となるが、せん断補強量によって安全性のマージンが著しく変化していく。
- (3) 剛性の低い連続繊維補強材をせん断補強に使用した場合で、補強材が破断に至らない場合は、剛性の低下に伴って、せん断耐荷力が低下していく。

なお、本モデルは、軸方向力が作用する場合にも拡張可能であり、今後この方向での検討も進めていく予定である。

参考文献

- [1] 佐藤、上田、角田：せん断補強筋として連続繊維補強材を有するコンクリートはりのせん断耐荷力状の解析的評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.2, pp.881~886, 1993
- [2] Schlaich, J., Schafer, K., Jennewein, M.: Toward a Consistent Design of Structural Concrete, PCI J., May-June, 1987
- [3] Vecchio, F.J., Collins, M.P.: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI J., pp.219~231, 1985
- [4] Anderson, N.S., Ramirez, J.A.: Detailing of Stirrup Reinforcement, ACI J., pp.507~515, September-October, 1989
- [5] Arthur, P., Clark, J.: Diagonal Tension in Reinforced Concrete Beams, ACI J., pp.145~156, October, 1951