

論文 軸方向引張力を受けるコンクリートはりのせん断強度寸法効果解析

平井 友紀*1 ・ 二羽 淳一郎*2 ・ 田邊 忠顕*3

要旨：作用する外力以外に、部材の拘束条件、温度変化、乾燥収縮等によって発生する軸方向引張力は、鉄筋コンクリート部材の耐荷力の低下につながるものであり、特にこれによってせん断強度が低下すると、脆性的破壊を引き起こすため軽視できない。本研究では、仮想ひび割れモデルを用い、ひび割れでのすべり、引張破壊特性の双方をモデル化し、せん断強度寸法効果解析を行った。予め、各軸方向引張力レベルに対するひび割れの発生位置を解析によって予測しせん断強度を求めた。その結果、軸方向引張力によってせん断強度が低下すること、はりの有効高さが大きくなると寸法効果は次第に消滅していくことが示された。

キーワード：せん断強度、引張軟化特性、すべり特性、仮想ひび割れモデル、寸法効果

1. はじめに

せん断強度に関する研究が進む中で、軸方向引張力を受けるはりの研究は十分ではなく、その特性は十分には明らかにされていない。土木学会コンクリート標準示方書でも、軸方向引張力を受ける場合の耐荷力の評価方法に理論的な裏付けが不足していると思われる。一般に外力によって軸方向引張力が発生することはまれであるが、部材の拘束条件やその変化、温度変化、乾燥収縮などによって軸方向引張力が作用する場合がある。このような軸方向引張力は、ひび割れ発生の原因にもなり、コンクリートの耐荷力に重大な影響をもたらすことは明らかである。これらを過小評価することによって、せん断破壊につながる可能性もある。田村らはせん断スパン比と軸方向引張力がせん断破壊特性に及ぼす影響について、実験的な検討を行っている〔1〕。

せん断破壊の寸法効果に関する研究は近年、精力的に進められており、仮想ひび割れモデルを基礎にし、数値解析によってコンクリートのせん断強度の寸法効果を検討した結果も報告されている〔2〕。著者らは、この種の問題を解くには破壊力学に基づいた解析が有効であると考え、仮想ひび割れモデルを用いて、すべり特性と引張軟化特性を同時にひび割れ面に与え、数値解析を行った。また、実験的研究が非常に困難である、巨大なサイズのコンクリートはりについても、解析的に軸方向引張力の影響を評価していくことが可能である。

2. ひび割れのモデル化

2. 1 破壊力学の適用

鉄筋コンクリートはりがせん断破壊に至る場合、部材中の応力が材料の固有の強度に達した後、直ちに破断するのではなく、実際にはエネルギーを吸収しながらある程度の荷重まで耐えることが知られている。したがって、ひび割れの形成過程をより適切にモデル化するため、コンクリートの軟化特性と破壊エネルギーを考慮し、解析に取り入れた。

コンクリートのひび割れを表すための破壊力学モデルとして、「仮想ひび割れモデル」と「ひ

*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）

び割れ帯モデル」がある。解析では、ひび割れ面を不連続面として捉える「仮想ひび割れモデル」を用いた。この場合、ひび割れの位置を予め適切に設定しておく必要があるが、数値解析的に比較的容易で、概念的にも明快であるためである。

実際には、引張応力によってマイクロなひび割れが形成されそれらが凝集して応力を伝達しないマクロなひび割れを形成するが、仮想ひび割れモデルでは、このような非回復性のひずみを1本の仮想ひび割れのひび割れ幅に置き換える。仮想ひび割れのみコンクリートの軟化特性を持たせ、その領域以外は弾性体と考える。ひび割れ幅と応力の関係は図-1に示す通りである。破壊エネルギーは曲線下の面積に等価である。

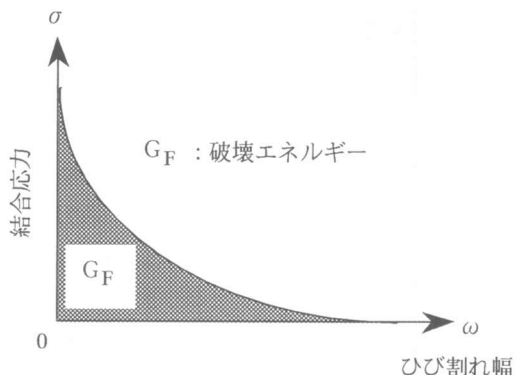


図-1 コンクリートの引張軟化挙動

一般に、ひび割れ先端近傍の応力場は大きく3つの型に分類することができる。ひび割れが互いに引き離れるような変形のMode I型（開き型）、ひび割れ面が互いにひび割れ先端に平行な軸に対して垂直にすべるような変形のMode II型（せん断型）、ひび割れ面が互いにひび割れ先端に平行な軸に対して平行にすべるような変形のMode III型（引裂き型）である。コンクリートはりがせん断破壊を起こすとき、せん断ひび割れと曲げひび割れが共存しながら破壊に至るが、平面問題ではせん断破壊を起こす場合、曲げひび割れ面ではMode I型の破壊特性が卓越する。一方、せん断ひび割れ面ではMode I型とMode II型の両方の破壊特性を有すると考えられる。したがって、せん断ひび割れ面ではこのような破壊特性を適切にモデル化して表現する必要があると考えられる。

2.2 引張軟化挙動のモデル化

ひび割れ面の各点に節点を2つずつ設置し、これらの節点の間に非線形特性を持つロッド要素をひび割れ面に垂直に配置した。引張軟化曲線には、1/4モデルを用いている（図-2）。なお、 G_F はコンクリートの破壊エネルギーでありこれは実験から求めることができる。このモデルでは、 ε_1 と ε_0 の値は次のように決まる。

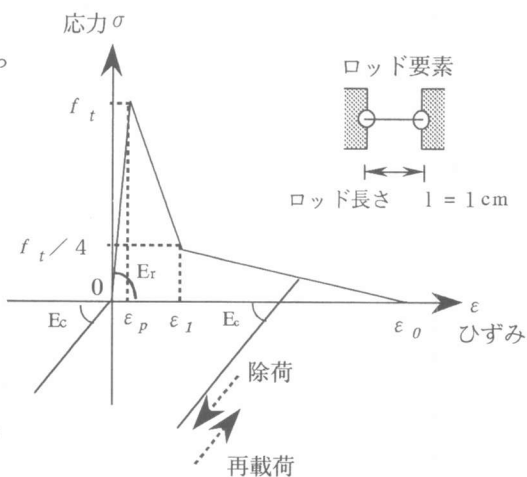


図-2 1/4モデル

$$\varepsilon_1 = 0.75 G_F / (f_t \cdot l) \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = 5 G_F / (f_t \cdot l) \quad (2)$$

ここで、 f_t は引張強度、 l はロッド長さである。ひび割れ幅 ω は、ロッド要素部分でのひずみ ε_r を用いて $\omega = \varepsilon_r \times l$ と表せる。解析ではロッド長さ l を単位長さ(1cm)として与え、 ε_1 、 ε_0 を決定した。ひび割れ発生以前の伸びをできるだけ抑制するために、引張強度到達以前の領

域では意図的に大きな剛性、 $E_R = 100 E_c$ (E_c はコンクリートの弾性係数)を与える。また、ひび割れの開閉を表現するために除荷載荷パスを与え、その接線剛性はコンクリートの弾性剛性に一致すると仮定した。

このような非線形ロッド要素を、曲げひび割れ面とせん断ひび割れ面の両方に設置し、これによってMode I型の破壊特性を表現した。

2. 3 せん断剛性のモデル化

ひび割れ面でのすべりの破壊力学特性は現在まで明確にはされていない。そこで、J C Iの破壊力学研究委員会が示した圧縮拘束を受ける直接せん断試験

[3]、Chenらの実験結果、提案を参考に、図-3に示すようなモール・クーロンの破壊基準を用いることにした。破壊面に作用する垂直およびせん断応力が破壊線の中にあれば弾性剛性とし、外にある場合、図-3のゾーンI、IIIの場合はすべり抵抗は0、ゾーンIIにある時は、その点からy軸に平行にx軸に向かって直線を下ろし、破壊線と交わったときのすべり抵抗をとるとした。すなわちゾーンIIでは、弾塑性体である。また、圧縮側は図-3の点Aを中心にとった半径 $f'c + ft$ の弧を破壊線とする[4]。このような破壊特性を持ったロッド要素を、ひび割れの2節点間でひび割れ面に平行にとなるように配置した。なお、各ロッド要素は単位長さ(1cm)を持ち、それぞれが代表するコンクリートの断面積と同じ面積を持つ。

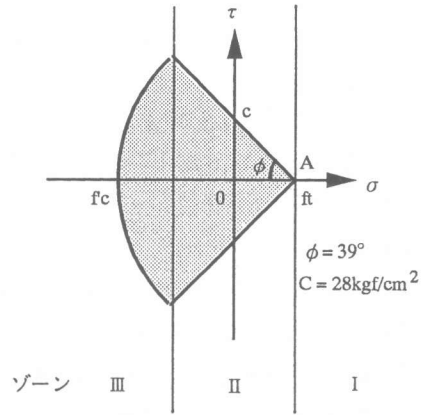


図-3 モール・クーロンの破壊線

また、圧縮側は図-3の点Aを中心にとった半径 $f'c + ft$ の弧を破壊線とする[4]。このような破壊特性を持ったロッド要素を、ひび割れの2節点間でひび割れ面に平行にとなるように配置した。なお、各ロッド要素は単位長さ(1cm)を持ち、それぞれが代表するコンクリートの断面積と同じ面積を持つ。

3. 数値解析の概要

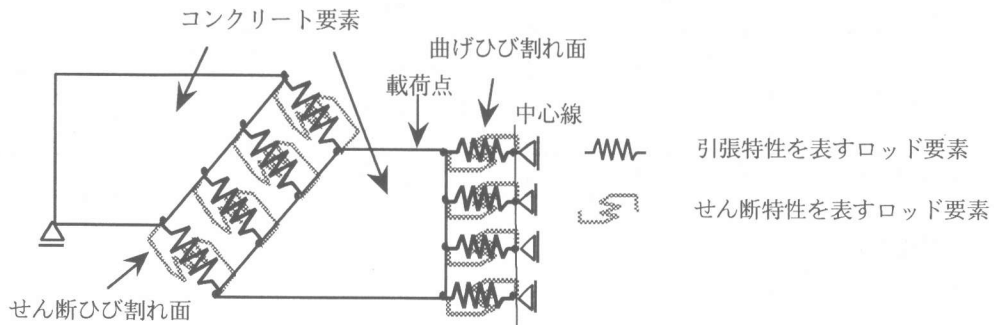
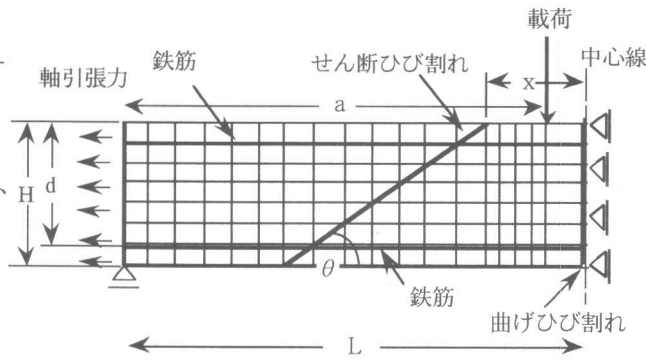


図-4 非線形ロッド配置の概念図

2点集中荷重を受ける単純支持されたコンクリートはり計算の対象とした。せん断補強はされていない。田村、重松らが行った実験結果[1]と比較するために、その供試体と同じ位置に同じ鉄筋比で鉄筋を配置した。補強鉄筋は弾塑性体とシラス要素で表現した。また、コンクリート要素は三角形要素で弾性体である。仮想ひび割れ面のロッド要素のみによって、コンクリートはりの非線形性を表現している。ひび割れは1直線形にモデル化した。図-4に曲げ、せん断の2つのひび割れ面に配置したロッド要素の模式図を示す。面に対して垂直なロッド要素は、引張

軟化特性を持ち、平行に設置されたロッド要素はせん断剛性を持っている。解析方法は、荷点に強制変位を与えていく変位制御型の増分解析である。軸力は、解析上の第一ステップで、左端の各節点が受け持つ分の軸力を節点力として与えている。なお、Newton-Raphson 法を用いて各イタレーション毎に剛性値を更新している。

解析に用いたパラメータは表-1に、はりの模式図は図-5に示す通りである。a/d およびはりの幅は一定にし、有効高さを10.0、18.0、50.0、100.0、200.0、500.0 cm、軸引張応



力を変化させた。 図-5 解析を行ったはりの模式図

せん断ひび割れのひび割れ発生位置は、荷点状態、はりの支持方法、主鉄筋の付着特性や定着状態、コンクリートの強度などによって変動する。解析にあたっては、このひび割れの位置を適切に定める必要がある。そこで、有効高さ10 cm のとき、4通りの各軸力について、最小せん断耐荷力を与えるようなせん断ひび割れ位置を決定する。まず、図-5に示す θ を固定してから x を変えていき、これを数種類の θ について行い、その中で最も低い耐荷力を示すものを最適な位置とみなすことにした。ひび割れは1直線にモデル化するので位置の決定に関するパラメータは x と θ である。

表-1 各種パラメータ

はりの幅	10.0cm	せん断スパン 有効高さ比	a/d=3.0
コンクリートの ヤング係数	$E_c = 3.0 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$	有効高さ はりの高さ比	d/H=0.91
コンクリートの 圧縮強度	$f_c = 300 \text{kgf/cm}^2$	有効高さ	d = 10.0 18.0 50.0 100.0 200.0 500.0 cm
コンクリートの 引張強度	$f_t = 30 \text{kgf/cm}^2$	軸引張応力	N = 0.0 5.0 10.0 20.0 kgf/cm ²
コンクリートの 破壊エネルギー	$G_F = 0.10 \text{kgf/cm}$	はりの上縁部の鉄筋量/有 効断面積	0.8%
鉄筋のヤング係数	$E_s = 2.0 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$	引張鉄筋比	1.2%

4. 解析結果

4. 1 ひび割れ位置の決定に関する解析結果

有効高さ $d = 10.0 \text{ cm}$ で、4通りの軸力がかかるとき、それぞれに対しせん断耐荷力が最小となるように x と θ のパラメータを決定した。その計算結果を図-6に示す。これによって、軸引張応力 0.0 kgf/cm^2 のとき $x = 0.6$ 、 $\theta = 50^\circ$ 、 5.0 kgf/cm^2 のとき、 $x = 0.5$ 、 $\theta = 50^\circ$ 、 10.0 kgf/cm^2 のとき、 $x = 0.6$ 、 $\theta = 55^\circ$ 、 20.0 kgf/cm^2 のとき、 $x = 0.5$ 、 $\theta = 55^\circ$ とした。

軸引張力が大きくなるに従って、ひび割れがはりの下縁となす角は大きくなり、さらに荷点方向に移る傾向にある。これは、田村らの実験でも示されているように、軸方向引張力が大きくなるほど、せん断破壊から曲げ破壊に移行するが、その過程でせん断ひび割れの角度が徐々に上昇していくことは容易に想像でき、実際のコンクリートはりの破壊挙動に合致すると考えられる。

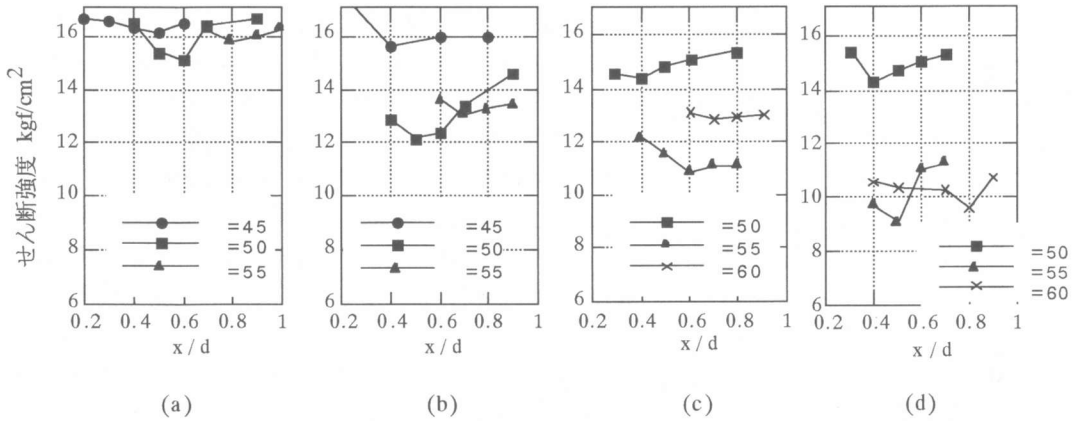


図-6 ひび割れ位置の決定に関する解析結果

(a) 軸力=0.0 kgf/cm² (b) 軸力=5.0 kgf/cm²
 (c) 軸力=10.0 kgf/cm² (d) 軸力=20.0 kgf/cm²

4. 2 寸法効果解析の結果

田村らによる実験 [1] との比較 (d = 20.0cm, 18.0cm の場合) を図-7 に示した。この実験で用いられた供試体と同じ鉄筋の配置、有効高さスパン比を持つはりについて解析を行った。実験値は非常にばらつきが大きいのが、軸引張力が大きくなるにつれてせん断強度が低下する傾向を持ち、解析値はこの点では同じ傾向にあると言える。

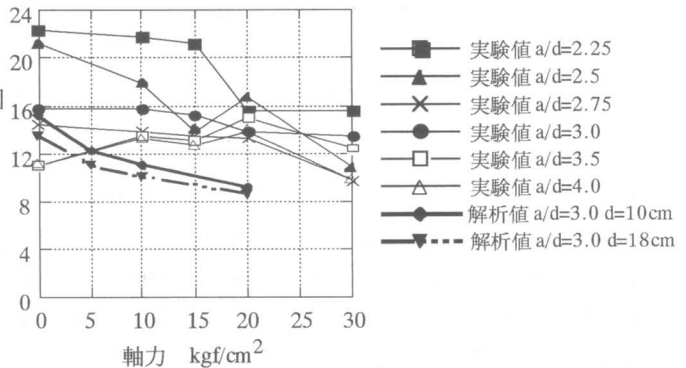


図-7 実験値と解析値の比較

次に、軸引張力別に解析を行った結果を図-8 に示す。有効高さが大きくなっても、軸方向引張力が大きいほどせん断強度は減少する傾向にある。軸方向引張力がない場合と同様に、軸力がある場合にも、同じような傾向の寸法効果が現れることが解析的に示された。図-8 はマクロ式 (3) [5]、および CEB MC90 に規定されている式 (4) と比較したものである。

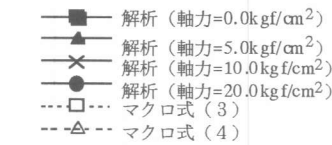
$$f_v = 0.94 (P_w \cdot f'_c)^{1/3} d^{-1/4} \left\{ 0.75 + \frac{1.4}{a/d} \right\} \quad (3)$$

$$f_v = 0.15 (P_w \cdot f'_c)^{1/3} \left(1 + \sqrt{0.2/d} \right) \quad (4)$$

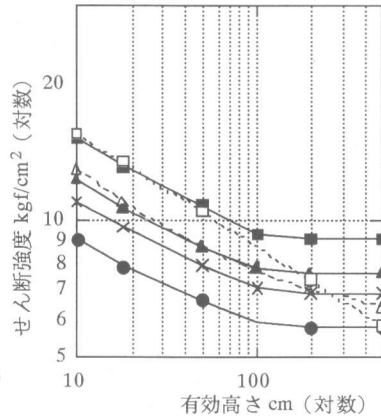
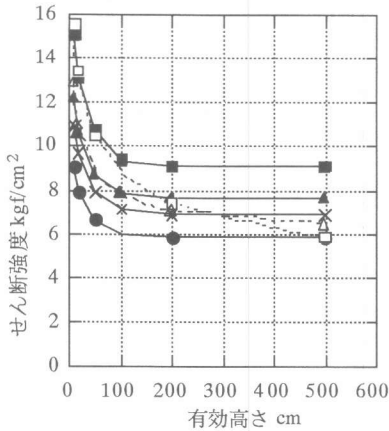
ただし、 P_w は鉄筋比 (%)、圧縮強度 f'_c (kgf/cm²) は式 (5) を用いて引張強度 f_t (kgf/cm²) より求めた。

$$f_t = 0.58 f'_c^{1/3} \quad (5)$$

解析結果では、有効高さが100cmまでは寸法効果によってせん断力の低下が起こっているが、それより高くなると次第に強度の低下が見られなくなり、ある値に収束していく。これに対して、



式 (3) の方は単調に減少し続け、このために解析値とは100cmまでは比較的近似しているが、その後は次第に離れていく。一方、収束してゆく傾向を持つ式 (4) と解析値を比較すると、強度そのものの値は解析値の方がやや大きい、寸法効果を示す下降す



るカーブは非常に近似している。これは、両対数グラフではより明確である。実験的な研究は有効高さ300cmまで行われているが、それ以上の場合については皆無である。解析結果では、有効高さが大きくなるとやがて、せん断強度の寸法効果は消失していく傾向にあることが予測される。

図-8 寸法効果解析の結果 (左: 一般座標、右: 両対数座標)

5. 結論

軸方向引張力を受けるコンクリートはりのせん断強度について、破壊力学に基づいて検討した。コンクリートの軟化特性とすべり特性の両方を、ひび割れに対して垂直と平行方向に設置したロッドによって表現し、解析を行った。本研究の結果、得られた結論は次の通りである。

- 1) 軸方向引張力を受けるはりの場合、せん断ひび割れ位置およびその角度は軸力の大きさによって変化することが示された。
- 2) 軸方向引張力が大きくなるほど、せん断強度は減少することが確認された。
- 3) 軸方向引張力が作用する場合も、作用しない場合と同様に、寸法効果が存在することが確認された。また、有効高さが極端に大きくなった場合、解析的には次第に寸法効果が消失していくことが予測された。

参考文献

- 1) 田村隆弘、重松恒美、原 隆、中野修治：軸方向引張り力を受けるRC梁のせん断耐荷力に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、Vol.22 No.2、pp. 153-160、1994.4
- 2) 二羽淳一郎、Nasra ZAREEN、田邊忠顕：破壊力学に基づくコンクリートはりのせん断強度寸法効果解析、土木学会論文集、No. 508 / V-26、pp.45 ~ 53、1995.2
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊力学研究委員会報告書、1993.10
- 4) Rots, J. G : Computational Case Studies of Size, Shape and Boundary Effects, Size Effect in Concrete Structures, E & FN SPON, pp. 335-350, 1994
- 5) 二羽淳一郎、山田一字、横沢和夫、岡村 甫：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集 No. 372 / V-5、pp. 167 ~ 176、1986.8