

論 文

[2149] 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
はりのせん断耐荷性状の解析的評価佐藤靖彦^{*1}・上田多門^{*2}・角田與史雄^{*3}

1.はじめに

連続繊維をコンクリートはりの補強材として用いる方法として、鉄筋と同様に主筋およびせん断補強筋としての利用が考えられ、その補強効果の定量化を目指し数多くの研究がなされている。

しかし、はり部材のせん断問題に対しては未だ不明瞭な点が残されており、的確にはりのせん断耐力を評価できるまでに至っていないのが現状である。特に、連続繊維をはり部材のせん断補強筋として用いた場合のせん断補強効果の定量化は、曲げ成形部での破断現象等の問題を含み、非常に難しい。これは、主として連続繊維補強材が、降伏域を持たない異方性弾性材料であること、および弾性係数が鋼材に比べ小さいといった材料特性に起因するものである。

そこで本研究は、せん断補強筋の弾性係数および降伏強度（降伏の有無）の相違に着目し、これらの補強筋の力学的特性が、はり部材のせん断耐荷性状に及ぼす影響を解析的に評価することを目的として行うこととした。

表-1 解析供試体

2. 解析の概要

2.1 解析プログラム

本研究で用いた解析プログラムは、鉄筋コンクリートはり部材のせん断問題に対して開発された2次元有限要素解析プログラムである[1]。本プログラムは、ひび割れの影響を平均的に捉え連続体に置き換えることのできるよう鉄筋コンクリート要素の平均応力-平均ひずみ関係を用いた分散ひび割れモデルを採用している。

2.2 解析モデル

本研究は、せん断補強筋の弾性係数の大きさ、およびせん断補強筋の降伏強度の大きさ(降伏の有無)の違いが、はりのせん断耐荷性状にいかなる影響を与えるかに関して解析的に検討することを目的とし、それらの比較が可能な3体のはり供試体の解析を行った。ただし、これらの供試体は、せん断スパン比が2.4、主筋比が4.0%、せん断補強筋比が0.42%と等しく、

解析 モデル	主筋の特性		せん断補強筋の特性		解析結果 せん断耐力 (kN)
	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	
NPPT	206	588	206	1255	240
NPAT	206	588	69	1255	225
NPST	206	588	206	294	219

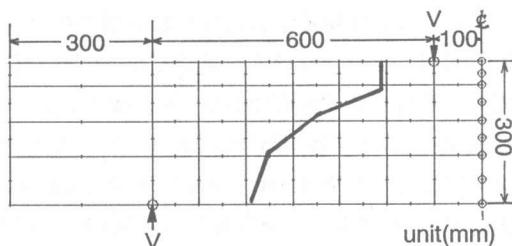


図-1 要素分割と仮定したフリーポティ

*1 北海道大学大学院 工学研究科土木工学専攻、工修（正会員）

*2 北海道大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*3 北海道大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

コンクリートの圧縮強度は、すべて39MPaとして解析した。表-1に本解析諸元を示す。また、図-1に要素分割を示す。

3.せん断耐荷性状

3.1せん断耐荷力の構成要素

一般に、斜めひび割れを持つはり部材の作用せん断力に対する力の釣合は、図-2に示すように、コンクリート圧縮域での抵抗力(V_{ucz})、骨材の噛み合わせ作用による抵抗力(V_{agr})に補強筋のダウエル作用による抵抗力(V_{dow})、さらにせん断補強筋による抵抗力(V_{web})により考えることができる。そこで、本研究では次式で表される耐荷モデルを仮定した。

$$V = V_{total} = V_{ucz} + V_{dcz}$$

V_{ucz} :コンクリート圧縮域で受け持つせん断力

V_{dcz} :斜めひび割れ域で受け持つせん断力

$$(= V_{agr} + V_{dow} + V_{web})$$

また、 V_{dcz} は、斜めひび割れ面のコンクリートが受け持つ力 V_{str} (= $V_{agr} + V_{dow}$)と、せん断補強筋が受け持つ力 V_{web} により構成されるものである。

せん断伝達モデルとして本解析で用いている李、前川モデル[2]を、はりのせん断ひび割れに適用する場合、実際に伝達されている応力よりも多少大きな伝達応力を算定する[3]。この点を考慮し、本解析で用いるせん断伝達モデルにより、ダウエル作用により伝達されるせん断力も考慮できるものとした。

3.2せん断補強筋の弾性係数の影響

図-3は、圧縮域と斜めひび割れ域よりなるフリーポディー(図-1)における作用せん断力に対する各分担力の推移を示すものである。せん断補強筋の弾性係数が小さい供試体NPATは、弾性係数が大きい供試体NPPTに比べ作用せん断力が約100kN付近より、分担力 V_{str} が大きく、分担力 V_{web} が小さくなる傾向にある。図-4は、荷重-せん断補強筋応力曲線を示すものであるが、弾性係数が小さい場合、どの位置においても同荷重に対する応力が小さい。しかし、図-5に示すように同荷重でのせん断補強筋のひずみは弾性係数が小さい場合の方が大きい。このことは斜めひび割れでの変形が大きいことを示している。

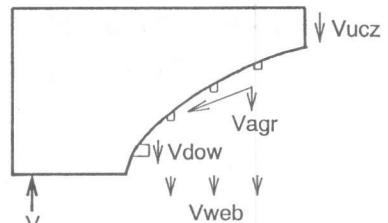


図-2 作用せん断力に対する力の釣合

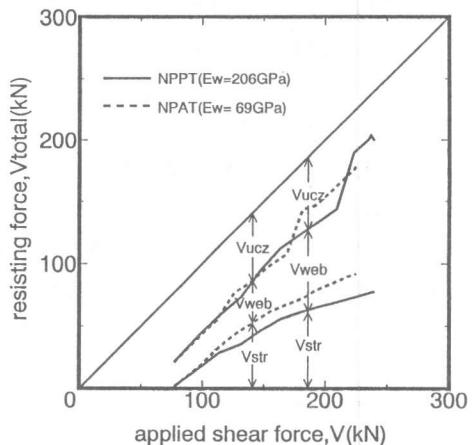


図-3 せん断分担力

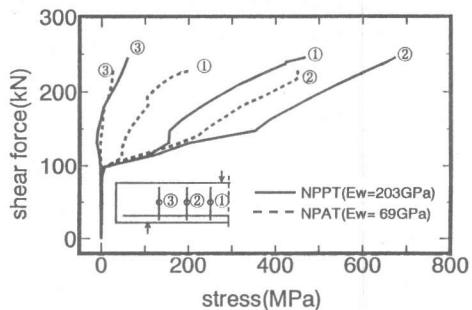


図-4 荷重-応力曲線

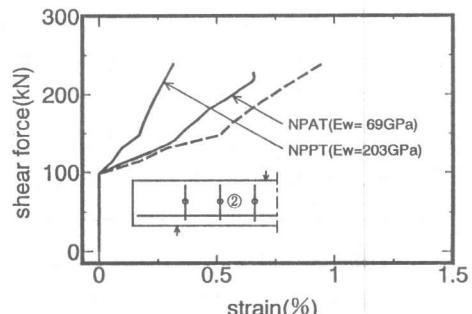


図-5 荷重-ひずみ曲線

もし、弾性係数が小さい供試体NPATのせん断補強筋が弾性係数が大きい供試体NPPTと同じ分担力 ($V_{w.b}$) を受け持つためには、弾性係数比 ($E_{NPPT}/E_{NPAT} = 3$) 倍のひび割れで変形（伸び）を起こさなければならぬ（図-5の点線）、実際のひずみはそれよりも小さいので応力は小さいのである。

斜めひび割れ面では、開きとともに相対的なずれ変形が存在し、このずれにより機械的な抵抗力が生ずる。この機械的な抵抗が骨材による噛み合せ作用である。図-6は、せん断力と斜めひび割れ域の中央部におけるひび割れ方向のせん断ひずみとひび割れ直角方向の引張ひずみの比との関係を示すものであるが、せん断補強筋の弾性係数が小さい場合には、ひび割れでの開きに対してずれ変形が大きく、このことは骨材の噛み合せによる伝達応力が大きいことを意味する。よって、せん断補強筋の弾性係数が小さい場合は、せん断補強筋の弾性係数が大きい場合に比べ、骨材の噛み合せによる分担力 V_{str} が大きくなり、せん断補強筋による分担力 $V_{w.b}$ が小さくても作用せん断力と釣合うものと思われる。

また、供試体NPPT、NPATともに作用せん断力が増加するにつれ、斜めひび割れ域での分担力 $V_{dec.z}$ が増加し圧縮域での分担力 $V_{uc.z}$ が低下しており、その傾向は、弾性係数が小さい供試体NPATにおいて早期に見られる。これは、図-7に示すようにせん断補強筋の弾性係数が小さい場合、同荷重に対する中立軸が高く圧縮域が狭いために分担せん断力 $V_{uc.z}$ が小さくなるものである。ただし、図中の実線①は、引張断面を無視した弾性計算値を示すものである。供試体NPPTとNPATは、せん断補強筋の弾性係数のみ異なるものであるからその弾性計算値は一致する。供試体NPAT、NPPTともに、曲げ領域における中立軸は、弾性計算値とほぼ一致しているが、曲げせん断領域においては、弾性計算値より高い位置にある。よって、終局時において曲げせん断領域での圧縮域が曲げ領域よりも減少していることがわかる。また、その大きさは、せん断補強筋の弾性係数の大きさにより異なることがわかる。

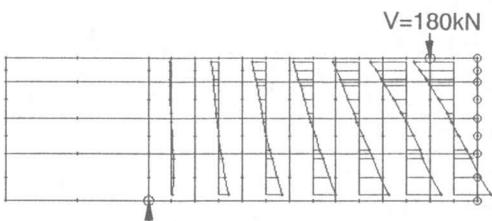


図-8 せん断ひび割れが発生しない場合の部材断面内の軸方向ひずみ (NPPT-NS)

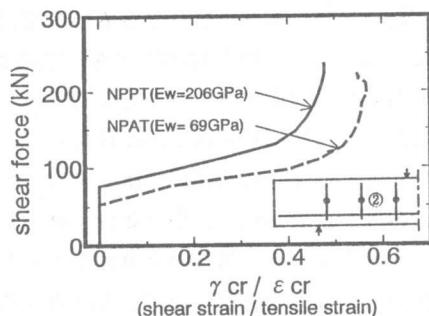


図-6 作用せん断力とせん断ひずみ/引張ひずみとの関係

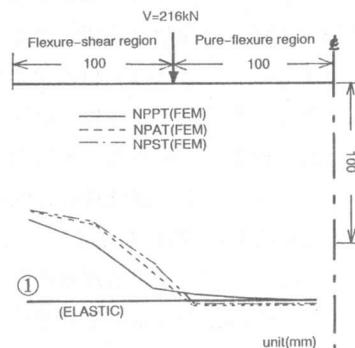


図-7 終局付近の圧縮域の中立軸 ($V=216kN$)

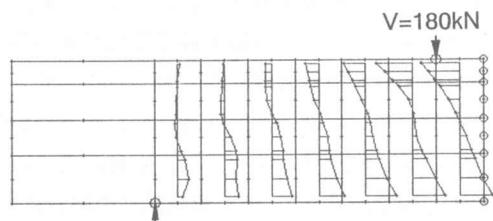


図-9 せん断ひび割れが発生する場合の部材断面内の軸方向ひずみ (NPPT)

図-8は、本解析プログラムのひび割れ発生条件を修正し、斜めひび割れの発生を許さないものとして解析した供試体NPPT-NSの部材断面内の軸方向ひずみを示す。また、図-9は供試体NPPTの軸方向ひずみを示すものである。この両者の比較より、斜めひび割れが発生することにより曲げせん断領域では、平面保持が成り立たないこと、および中立軸が上昇することがわかる。よって、曲げせん断領域では、斜めひび割れにより圧縮域が減少することがいえる。さらに、この曲げせん断領域での中立軸は、せん断補強筋の弾性係数が小さければ、弾性係数が大きいものに比べ上昇し、圧縮域がより減少するものといえる。この圧縮領域の大きさは、はりの終局せん断耐力に大きな影響を及ぼすものであるが、のことについては、後述することとする。

3.3 せん断補強筋の降伏の影響

図-10は、せん断補強筋の弾性係数が等しく、降伏強度が大きい供試体NPPTと降伏強度が小さく降伏を起こす供試体NPSTの作用せん断力に対する各分担力の推移を示すものである。図-11に示す荷重-せん断補強筋応力曲線にみられるように、降伏を起こしたと思われる130kN付近から両者のせん断力分担性状が異なる。この場合も先に示した弾性係数の大きさによる違いと同じ傾向にあり、降伏を起こすことにより V_{web} が低下し、 V_{str} による分担力が増加していることがわかる。また、供試体NPSTは、せん断補強筋の降伏後に曲げせん断領域における中立軸が、供試体NPPTに比べ上昇している(図-7)。これらの現象は、せん断補強筋の降伏により、弾性係数が小さくなつたものと見なすことができ、弾性係数の大きさが与える影響が現れたものと考えることができる。

4. せん断耐力

4.1 せん断耐力

本解析の破壊は、3体すべて載荷点付近のコンクリートが軟化を起こすことにより破壊に至っている。これは、実際の破壊形式と一致しているものである[4]。そこで、載荷点付近のコンクリート圧縮域における応力状態を比較することによりその破壊を考える。検討領域として図-12に示す3つの圧縮域断面(載荷点からa=88.7、b=50.0、c=11.3mmの位置)を考える。図-13は、作用せん断力(V)と各断面での V_{ucz} の変化を示すものであるが、せん断補強筋の弾性係数が小さい場合、どの断面においても終局耐力付近になると V_{ucz} が小さい傾向にある。降伏を起こす供試体NPSTでは、降伏後に同様の傾向が現れている。また、ここで着目すべき点は、どの供試

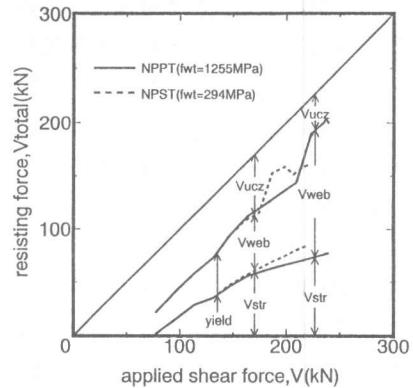


図-10 せん断分担力

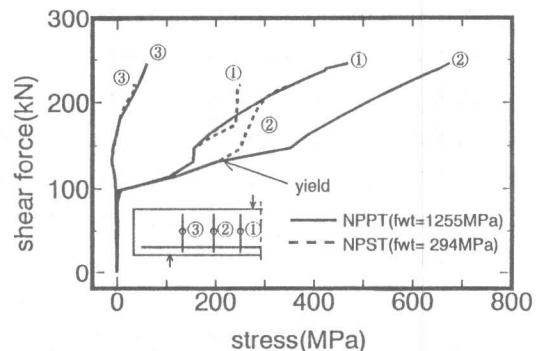


図-11 荷重-応力曲線

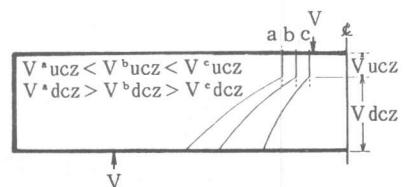


図-12 斜めひび割れの異なる想定位置に基づくフリーボディー

体においても載荷点に近い位置においてより大きなせん断力を V_{ucz} で受け持っていることである。これは、図-12に示すそれぞれの圧縮域断面を含むフリーポティ-を考えた場合、載荷点から離れるに従い斜めひび割れでの変形が大きく、 V_{dcz} による分担力が大きいためである。図-14は、 V_{ucz} を圧縮域面積で除した平均せん断応力を示す。せん断補強筋の弾性係数が小さい場合、および降伏を起こす場合には、作用せん断力に対するc断面における平均せん断応力の増加割合が大きい。これは、先に述べたように弾性係数が小さい場合や降伏を起こす場合には、弾性係数が大きく降伏を起こさない場合に比べ、圧縮域面積が小さいためである。また、どの供試体においても載荷点に最も近いc断面での平均せん断応力が、ほぼ8 MPaで破壊に至っている。一方、図-15は、載荷点に最も近い圧縮域断面での平均圧縮応力を示すものであるが、どの供試体においてもおよそ30 MPaで破壊に至っていることがわかる（この時、圧縮域での最大応力は圧縮強度（39 MPa）に達していた）。よって、本解析供試体において、これらの平均応力が限界応力であると考えると、せん断補強筋の弾性係数が小さい場合、およびせん断補強筋が降伏を起こす場合には、圧縮域が小さいために早期に限界応力に達し破壊を起こすものと判断できる。

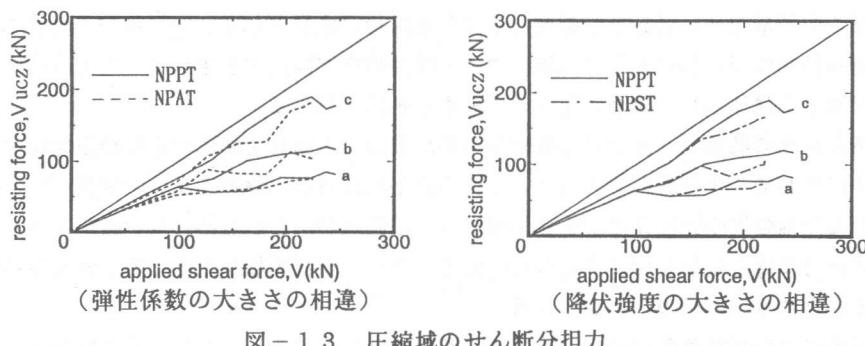


図-13 圧縮域のせん断分担力

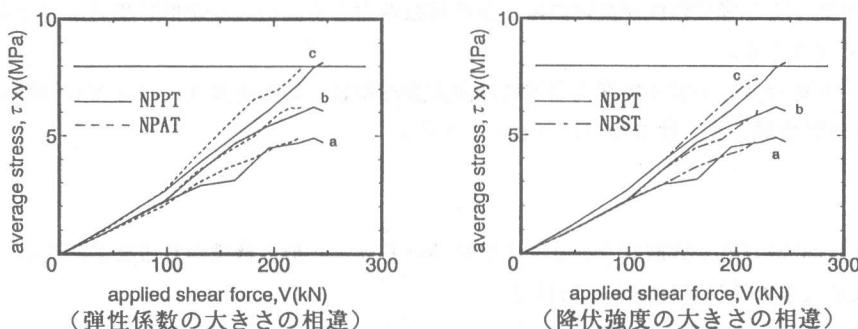


図-14 圧縮域の平均せん断応力

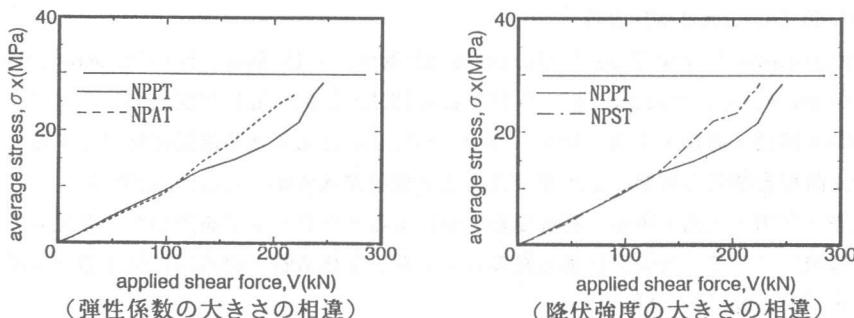


図-15 圧縮域の平均圧縮応力

4. 2 せん断補強筋の剛性とせん断耐力

本解析における各供試体の破壊荷重は表-1に示すように、せん断補強筋の力学的特性により差異が生じている。この結果を整理したものが図-16である。せん断補強筋の弾性係数が大きければせん断耐力は増加する ($V_{NPPT} > V_{NPAT}$)。しかし、弾性係数が大きくても降伏が起こることにより、せん断補強筋の剛性が低下し、せん断耐力は低下する ($V_{NPPT} > V_{NPST}$)。また、本解析のように弾性係数が小さくても、弾性係数が大きく降伏を起こすものよりせん断耐力が大きくなる場合 ($V_{NPAT} > V_{NPST}$) もあり、このことは、我々が行った実験結果と一致している [5]。

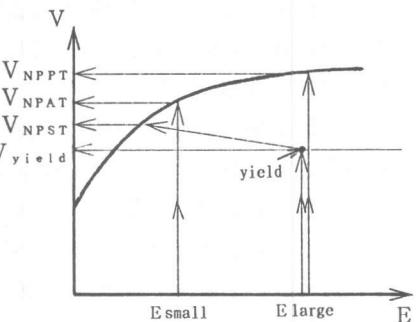


図-16 せん断耐力とせん断補強筋の剛性

5.まとめ

- (1)曲げせん断領域では、斜めひび割れにより平面保持が成り立たず、中立軸が上昇する。
- (2)せん断補強筋の弾性係数が小さい場合やせん断補強筋が降伏する場合は、せん断補強筋の弾性係数が大きく降伏しない場合に比べ、より中立軸は上昇する。
- (3)本解析供試体の破壊は、曲げせん断領域の圧縮域での平均せん断応力と平均圧縮応力が一定のレベルに達して生ずるものであった。これらの平均応力を本解析供試体の限界応力と仮定すると、せん断補強筋の弾性係数が小さい場合は、圧縮域が小さいために低い荷重レベルで圧縮域が限界応力に達し破壊を起こすものといえる。また、弾性係数が大きくてもせん断補強筋が降伏する場合には、同様のことがいえる。
- (4)せん断補強筋の弾性係数が小さければせん断耐力は減少する。しかし、せん断補強筋の弾性係数が小さくても降伏強度が高ければ、弾性係数が大きく降伏強度が低い場合よりせん断耐力が大きくなりうる。

なお、本研究は、平成4年度文部省科学研究費補助金（総合研究A・課題番号04302040・研究代表：角田與史雄）を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] ナレス パンタラーン：鉄筋コンクリート梁におけるせん断抵抗機構の有限要素解析、東京大学大学院学位論文、1991.3
- [2] Li, B., Maekawa, K. and Okamura, H.: Contact Density Model for Stress Transfer Across Cracks in Concrete, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo(B), Vol. 40, No. 1, pp. 9-52, 1989
- [3] Pantatarorn, N. and Ueda, T.: Analysis of Beams with Shear Reinforcement by Finite Element Method, Proceedings of JCI, Vol. 13, No. 2, pp. 1021-1026, 1991
- [4] 西園・佐藤・高橋・上田・角田：レーザースペックル法による連続繊維補強コンクリートはりのせん断変形挙動の解明、土木学会北海道支部論文報告集、VOL49、1993.2
- [5] 佐藤・和田・上田・角田：有限要素解析によるF R P ロッドを用いたR Cはりのせん断耐荷機構について、連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム、土木学会、pp. 173-180、1992.4