

論文 中空円断面鉄筋コンクリート構造のせん断耐荷性能

辻昌宏^{*1}・井上貴之^{*2}・山口隆裕^{*3}・池田尚治^{*4}

要旨：中空円断面を持つ鉄筋コンクリート構造のせん断耐荷挙動を把握する目的で、中空円断面の一部をウェブに持つ梁供試体を用いて、正負繰返し載荷実験を行った。この結果、正負繰返し載荷によるコンクリートの損傷により、せん断耐荷挙動が脆性的となる恐れのあることが示された。この原因として、ウェブが曲面を有するためフープ筋が曲率を持つこととなり、曲率を持っていない場合に比べてフープ筋の軸方向剛性が小さくなることに因ることが実験によって明らかにされた。この現象の基本的特性は、有限要素法による解析によっても裏付けられた。

キーワード：鉄筋コンクリート、中空円断面、せん断耐力、曲面ウェブ、正負繰返し載荷

1. はじめに

円断面を有する鉄筋コンクリート橋脚においては、中空断面が採用されている場合がある。しかしながら、最近の研究で中空円断面を持つ部材は、地震のような正負繰返し荷重下によるせん断力に対して中実断面とは異なる耐荷挙動を示し、脆性的な挙動を示す場合のあることが示唆された[1][2]。

本研究は、この点に着目して行った実験的研究であって、実験に際しては、これを合理的に行うことを目的として中空円断面の一部をウェブに持つ梁供試体を用いて、正負繰返し載荷実験を行うこととした。

2. 実験供試体

用いた供試体の断面と対象とした中空円断面との対応を図-1に示す。対象とした中空円断面の大きさは、外径1000mm、肉厚100mmであり、軸方向鉄筋は2段に配筋され、フープ筋も各段に配筋され2重となっているものとした。供試体は、そのうちの片側半分に着目したもので、図に示すように曲面のウェブと、上下対称となる

フランジによって構成された梁部材となっている。曲面ウェブでは、軸方向鉄筋が側方鉄筋、フープ筋がスターラップとなっている。フランジの形状と主鉄筋量は、ウェブ部に対象とした中空円断面と同等なせん断力が作用するように考慮して決定した。

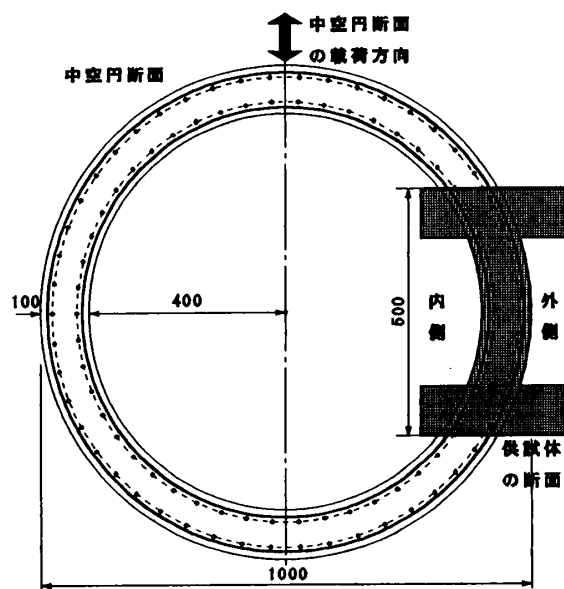


図-1 供試体の断面と対象とした中空円断面との対応(:mm)

*1 横浜国立大学大学院 工学研究科計画建設学専攻 (正会員)

*2 横浜国立大学大学院 工学研究科計画建設学専攻

*3 横浜国立大学助手 工学部建設学科 (正会員)

*4 横浜国立大学教授 工学部建設学科、工博 (正会員)

供試体の形状と断面図を図-2に、諸元を表-1にそれぞれ示す。供試体は、フランジの幅300mm、断面の高さ500mm、全長3500mm、スパン3000mm、せん断スパン桁高比2.72、スターラップの間隔100mmの梁部材で、その総数は5体である。表-1に示すTYPE-1は、基準となる供試体で、対象とした中空円断面をモデル化したものである。TYPE-2は、曲面ウェブ外径面を炭素繊維シート（以下、CFSと記す）で補強したものである。TYPE-3は、内径面側のスターラップ（以下、内スターラップと記す）と外径面側のスターラップ（以下、外スターラップと記す）をフックのついた鉄筋（以下、つなぎ筋と記す）でつないだものである。TYPE-4は、ウェブの形状が通常のように長方形（以下、直面ウェブと記す）であり、曲面ウェブとの形状の相違を比較するものである。TYPE-5は、曲面ウェブの内厚を1.5倍の150mmにしたものである。供試体の製作に使用した各材料の力学的特性を表-2に示す。

表-1 供試体の諸元

供試体名	軸方向鉄筋比 (%)	寄鉄筋比 (%)	ウェブ曲率半径 (mm)	ウェブ内厚 (mm)	備考
TYPE-1	2.97	1.43	500	100	基準
TYPE-2					CFS補強
TYPE-3					つなぎ筋
TYPE-4			—	—	直面ウェブ
TYPE-5	2.53	0.95	500	150	内厚1.5倍

表-2 材料試験結果の一覧

コンクリート				
供試体名		圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
TYPE-1, 4, 5		27.7	2.41	26.1
TYPE-2		34.5	2.87	28.2
TYPE-3		31.5	2.62	26.0

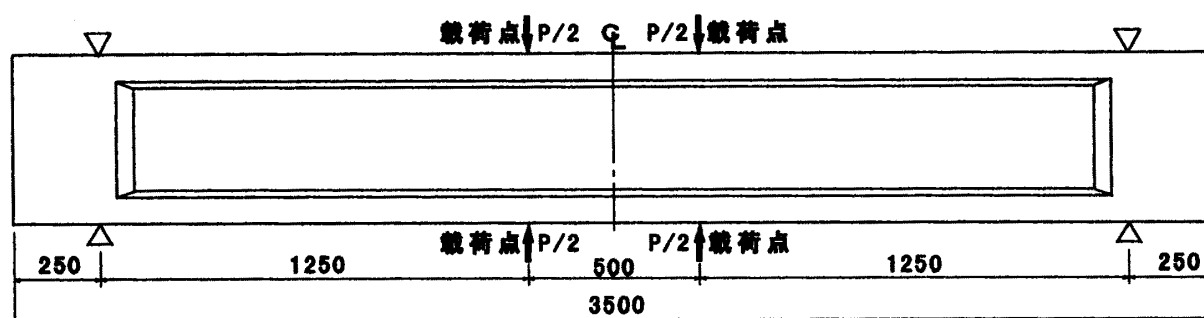
鉄 筋					
呼び径	規格	母材強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	用 途
D6	SD295A	348	528	192	つなぎ筋・寄鉄筋
D10		366	522	193	側方鉄筋・スターラップ
D19		SD345	357	547	195

炭素繊維シート				
繊維目付量 (g/m ²)	繊維断面積 ^{*1} (mm ²)	設計厚み ^{*2} (mm)	引張強度 ^{*3} (MPa)	弾性係数 ^{*3} (GPa)
300	2.06	0.165	2940	372

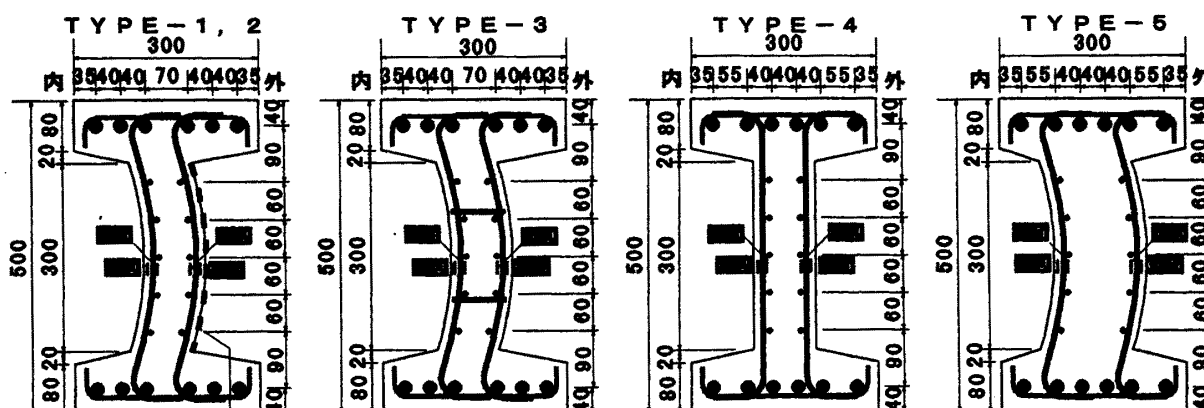
*1 繊維12K(12000本)の総断面積と重さの総値より求めた値

*2 繊維断面を引張試験片の幅で割り、試験片の幅とピッチの比をかけた値

*3 鋼筋を含ませた幅12.5mm、厚さ0.165mmの試験片の引張試験結果



供試体側面図と荷荷状況



供試体断面図

※スターラップは、100mm間隔で配置。

図-2 供試体の形状と断面図(:mm)

3. 正負繰返し載荷実験

3.1 載荷方法

載荷は、各供試体の計算降伏荷重時におけるスパン中央変位の正負の平均値を降伏変位 δ_y とし、変位を $1\delta_y$ ずつ増加させながら、大幅な耐力の低下が生じるまで各変位で1回の正負載荷を行うことを基本とし、曲げ区間500mmの2点載荷とした。ここで計算降伏荷重は、フランジ部の引張主鉄筋が計算上で降伏ひずみに達するときの荷重とし、材料の非線形性を考慮し、曲面ウェブはウェブの肉厚の等しい直面ウェブとしてファイバーモデルにより求めた値である。

表-3 計算値と実験値の比較

供試体名	計算値			実験値			
	降伏荷重 (kN)	最大 曲げ耐力 (kN)	せん断 耐力 (kN)	降伏変位 (mm)	最大耐力 (kN)	最大耐力 降伏変位 (δ_y)	靱性率
TYPE-1	445	546	510	8.5	500	-2	2
TYPE-2			910	8.2	514	+4	3
TYPE-3			510	8.7	514	+3	3
TYPE-4			510	8.3	492	-3	3
TYPE-5			541	7.9	506	+4	3

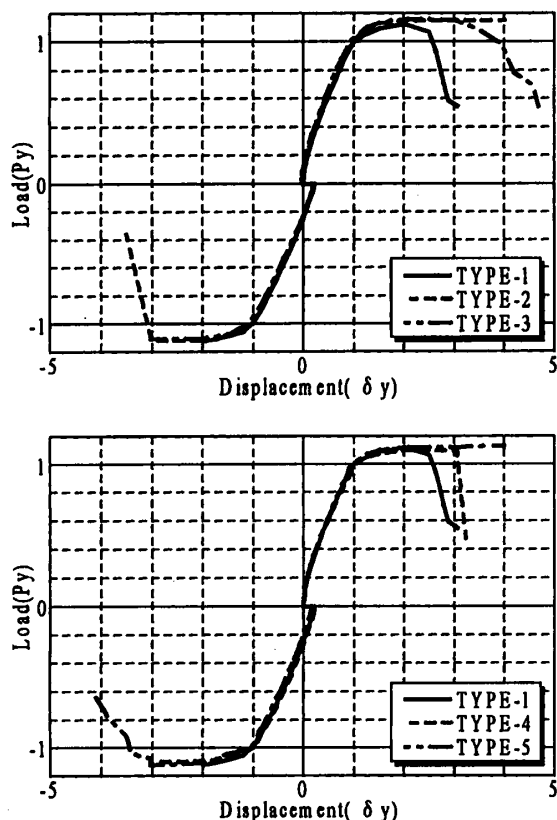


図-3 荷重と変位曲線の包絡線

3.2 実験結果と考察

(1) 耐荷挙動と靱性率

各供試体の計算値と実験値の比較を表-3に示す。ここで計算せん断耐力とは、平成8年版土木学会コンクリート標準示方書[3]（以下、示方書と記す）のRC棒部材の設計せん断耐力の式を用い、部材係数 $\gamma_b=1$ として求めた値である。TYPE-2の値は、貼付したCFSをせん断補強筋量に換算して求めたものである。靱性率は、各供試体の計算降伏荷重を下回らない最大変位を、各供試体の降伏変位で除した値とした。図-3に実験より得られた荷重-変位曲線の包絡線を示す。縦軸と横軸の値は、各供試体の計算降伏荷重と降伏変位でそれぞれ除し、無次元化したものである。

TYPE-4は、通常の直面ウェブであるが、実験上の最大耐力が492kNとなり、計算せん断耐力の510kNに若干達しなかった。地震時には、正負繰返し載荷を受けることを考えれば、示方書の設計せん断耐力、とりわけコンクリートの受け持つせん断耐力を低減させる必要があると思われる。基準供試体である曲面ウェブのTYPE-1では、最大耐力はTYPE-4とほぼ等しいが、靱性率がそれより小さくなった。この結果より、ウェブの形状が曲面で、スターラップが曲率を持つことにより、繰返し荷重下でのせん断に対する耐荷能力は直面ウェブより低下することが示された。肉厚が厚いTYPE-5およびつなぎ筋を有するTYPE-3では、TYPE-1より靱性率が大きくなり、ウェブの形状が同じ曲面であっても、肉厚の違いやつなぎ筋の有無によってせん断に対する耐荷能力は異なる結果となった。フープ方向にCFSで補強されたTYPE-2では、表-3に示す計算せん断耐力が遙かに大きな値であるが、CFSを1周巻き付けていないため、CFSが破断する前に剥がれ、最終的にせん断破壊を起こした。

(2) 損傷状況

曲面ウェブのTYPE-1と直面ウェブのTYPE-4について降伏変位の2倍となる変形時における外

側の損傷状況を図-4に示す。せん断区間で発生した曲げひび割れが、斜め方向に傾き始めているのを確認することができたのは、どちらのタイプも同じで157kN時であった。 $+2\delta_y$ 時には、両タイプとも図に示すようにせん断区間全面にわたって斜めひび割れが大きく伸展しているが、曲面ウェブであるTYPE-1の方が斜めひび割れの発生本数も多く、その伸展も早く、損傷の度合も大きい結果となった。また5体ともすべてせん断スパン中央付近の損傷が最も大きくなり、最終的にせん断破壊を起こした。

(3) スターラップのひずみ

各供試体のスターラップの荷重-ひずみ関係を図-5に示す。図に示したひずみは、せん断スパンのほぼ中央のスターラップにおける梁高さの約1/2の位置での測定値で、ゲージは図-2に示すように曲率の凸部と凹部に貼付している。図中に示す記号は、曲面ウェブの場合、それぞれ内スターラップの凹部がI-U、凸部がI- $\cap$ 、外スターラップの凹部がO-U、凸部がO- $\cap$ となっており、直面ウェブの場合もこれと対応している。

直面ウェブのTYPE-4のひずみ値は、4カ所ともほぼ同じ値を示し、通常行われているように1カ所の両面に貼付したひずみゲージの値を平均することにより、そのスターラップのひずみ挙動を評価できるが、曲面ウェブを有する他の4体のひずみ値は、内と外のスターラップで値が異なるとともに、同じスターラップの凹部と凸部でも大きく異なっている。基準供試体であるTYPE-1の場合、内と外のスターラップでは内スターラップが、凹部と凸部では凹部が早期に降伏しており、結果として内スターラップの凹部が最も早く降伏ひずみに達した。直面ウェブと曲面ウェブでスターラップのひずみ値を比較してみると、曲面ウェブのTYPE-1では、 $+1\delta_y$ 時で内と外のスターラップとも凹部のひずみが降伏ひずみに達し、 $\pm 2\delta_y$ の載荷で6000 μ を超えていたが、直面ウェブのTYPE-4では、4カ所のひずみ値とも $\pm 1\delta_y$ の載荷までは降伏ひずみ

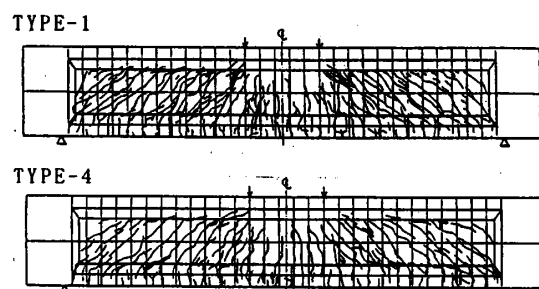


図-4 損傷状況

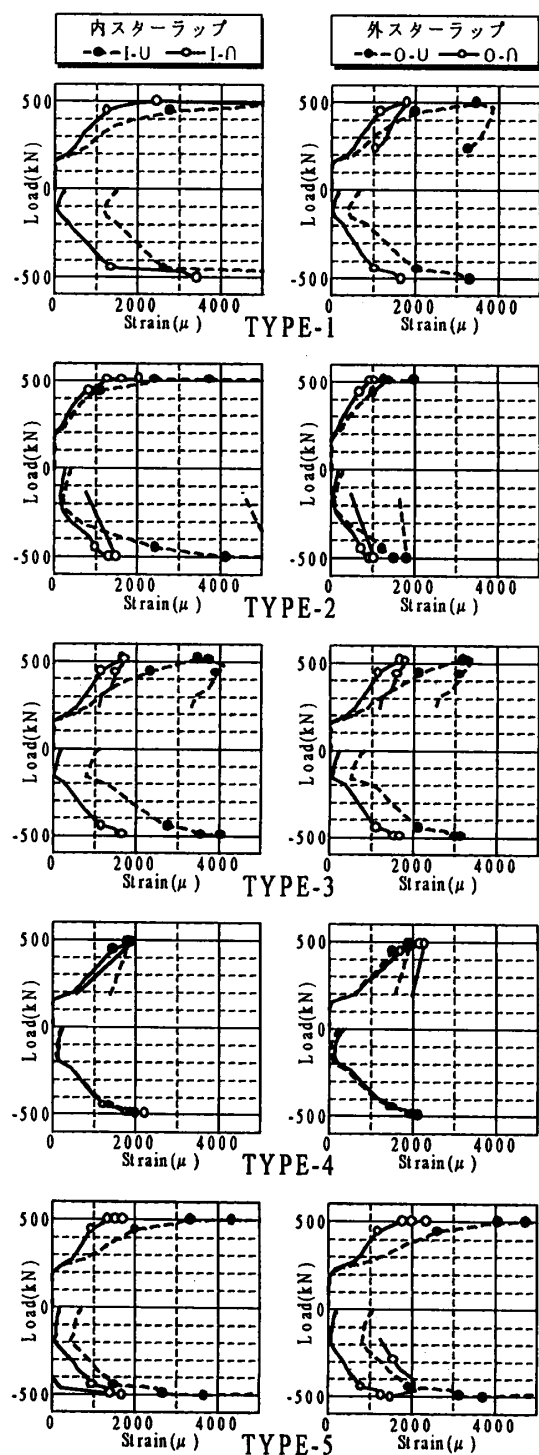


図-5 スターラップの荷重-ひずみ関係

を越えず、 $\pm 2\delta_y$ の荷重でも2000 μ を少し越えた程度であった。スターラップは、曲率を持つことによって持たない場合に比べて局部的に、かなり早期に降伏ひずみに達することが確認された。

TYPE-5では、TYPE-1と比べて肉厚が厚くなったことにより内スターラップのひずみが各荷重レベルで小さい値となった。このことより、耐荷挙動における靱性率に差が生じたものと考えられる。

つなぎ筋を有するTYPE-3においては、肉厚の厚いTYPE-5の場合と同様にTYPE-1に比べて内スターラップのひずみが大きく抑えられ、内と外のスターラップで差のない同じひずみ挙動を示すことが観測された。また、つなぎ筋自体にも最大で900 μ の引張ひずみが観測されており、曲率を持つ内と外のスターラップをフックのついた鉄筋でつなぐことは局部的なひずみの増大を防ぐのに非常に有効であることが確認できた。

CFSで外径面のフープ方向のみ補強したTYPE-2では、TYPE-1に比べ、CFSを貼付した側である外スターラップのひずみの発生が抑制されていた。この場合、つなぎ筋を併用すれば、内スターラップのひずみ抑制にも大きな効果が発揮され、CFSによる補強効果もより増大するものと考えられる。

(4)せん断中央面のコンクリートひずみ

曲面ウェブのTYPE-1と直面ウェブのTYPE-4について荷重とせん断中央面におけるコンクリートのひずみの解析値と実験値の比較を図-6に示す。今回の解析は、3次元の立体モデルを用いて有限要素法の汎用構造解析プログラム(ANSYS)により行ったものである。比較対象範囲は、せん断区間で発生した曲げひび割れが、斜め方向に傾き始めているのを確認できた荷重近傍の118kN時までとし、解析における材料特性は、コンクリートの弾性係数と一致させた線形完全弾性体とした。ひずみの測定位置は、せん断スパン中央で梁高さの約1/2の位置の内径面

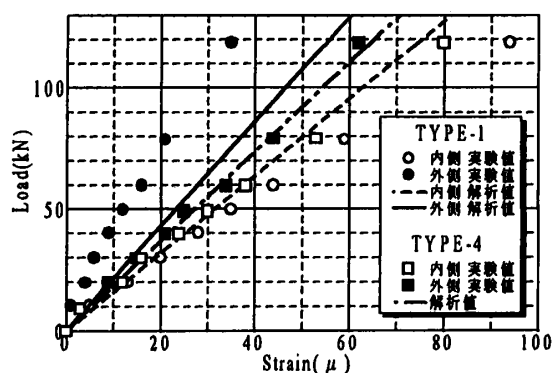


図-6 せん断中央面のコンクリートひずみ

と外径面それぞれの表面である。解析値はその位置での主引張方向のひずみを、実験値は解析値の方向にほぼ等しい斜め45度の方向のひずみを示す。

曲面ウェブであるTYPE-1において、実験より得られたコンクリートの引張ひずみは、同じ荷重レベルでは、スターラップと同様に外径面より内径面の方がひずみの値が大きくなる傾向が示された。また、3次元の有限要素解析の結果もこの傾向をよく表している。直面ウェブのTYPE-4の場合は、解析値は当然ながら1本の直線となり、実験値も外径面と内径面での値に大きな差は見られなかった。

4. 中空円断面のせん断耐力

得られた実験結果を基に、中空円断面のせん断耐力を、中実の長方形断面のせん断耐力と比べながら評価すると次のことがいえる。コンクリート部材のせん断耐力は、中実断面であっても一方向に荷重を受けるより、正負繰返し荷重を受ける方が小さくなる傾向がある。それは、コンクリートの損傷度合が荷重方法によって異なり、正負繰返し荷重を受ける方がその度合が大きくなるからである。断面形状が長方形から円形になった場合、フープ筋(今回の実験では、スターラップ)が曲率を持つこととなり、曲率を持っていない場合に比べて局部的に早期に降伏し、フープ筋の受け持つことのできるせん断力も低下することとなる。この低下の割合は、当然ながら一体となってせん断に抵抗するコン

クリートの損傷度合によっても変動するものである。また、曲率を持つフープ筋が曲げを受けることは、フープ筋の軸方向剛性を大幅に低下させることとなる。したがって、中空円断面で肉厚が薄い場合には、繰返し載荷によるコンクリートの損傷は急速に進み、かつフープ筋の軸方向剛性も非常に小さくなるので、フープ筋の受け持つことのできるせん断力が大きく低下することとなる。そして、その結果として中空円断面部材の正負繰返し載荷によるせん断耐荷挙動は、中実の円断面の場合より、さらには中空の長方形断面の場合より脆性的なものになると考えられる。現行の示方書[3]では、中空円断面の設計せん断耐力を面積の等しい正方形箱形断面に換算して求めることになっているが、以上のことを考慮すると、何らかの安全係数を用いて中空円断面のせん断に対する安全度を確保する必要があると思われる。なおこの安全係数は、ウェブの厚さ、すなわちせん断耐力においてせん断補強筋が受け持つ部分とコンクリートが受け持つ部分の比率やつなぎ筋の有無、およびC F Sなどによる補強の有無などを考慮して定めるのがよい。またウェブの曲率半径と、ウェブの厚さの比に制限を設けることも必要である。

5. まとめ

本研究により得られた結果をまとめると次の通りとなる。

(1) フープ筋（今回の実験では、スターラップ）が曲率を持つことにより、曲率の凹部が、持たない場合に比べて早期に降伏することが確認できた。このことは、フープ筋が曲げを受けることを示すものであり、フープ筋の軸方向剛性の大幅な低下を意味するものである。

(2) 中空円断面でフープ筋が2重に配筋されている場合、外径面に近いフープ筋より内径面に近いフープ筋が、せん断により早期に降伏することが示された。

(3) 中空円断面でのフープ筋の局部でのひずみ

値の急激な増大は、内と外のフープ筋をフックのついた鉄筋によりつなぐことや、肉厚を厚くすることによって抑制されることが確認できた。

(4) 中空円断面に対して、C F Sなどによるせん断補強が有効であることが示された。また内と外のフープ筋をつなぐつなぎ筋を併用することにより、その効果は飛躍的に向上するものと思われた。

(5) 中空円断面のせん断に対する設計においては、適切な安全係数を用いて安全度を確保することが必要である。またウェブの曲率半径と、ウェブの厚さの比に制限を設けることも必要である。

(6) 実験を行った結果、長方形断面の場合でも、部材係数 $\gamma_b=1$ とした計算せん断耐力に到達する前に、せん断破壊が生じ、耐力が低下した。このことは、現行の示方書[3]のせん断に関する設計方法は正負繰返し載荷に対して不十分なものであることを示すものである。

謝辞

供試体の製作においてはオリエンタル建設㈱の岩淵氏と小宅氏、実験の実施にあたっては横浜国立大学の森下技官に多大の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 山口・辻・葛野・池田：軸方向鉄筋の途中定着を有する中空円断面コンクリート橋脚の耐震性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 2, pp. 657-662, 1997
- [2] 長田・山口・池田：軸方向鉄筋量と断面の肉厚が変化する中空円断面RC橋脚の耐震性能とその耐震補強，コンクリート工学論文集，（投稿中）
- [3] 土木学会：コンクリート標準示方書設計編（平成8年制定）