

# 論文 水平補強筋及びスターラップを有するディープビームのせん断耐力について

佐藤靖彦\*1・上田多門\*2・角田與史雄\*3

**要旨**：本研究において、有限要素解析に基づき、せん断補強筋を持たないディープビームに対するせん断耐力式を、水平補強筋及びスターラップを有するディープビームに対して適用できるように修正した。本研究で提示したせん断耐力式により、実験結果を概ね評価できることを確認した。

**キーワード**：水平補強筋、スターラップ、ディープビーム、せん断耐力

## 1. はじめに

一般に、はりのせん断耐力はせん断スパン比が小さくなるにつれ増加し、せん断補強筋（スターラップや水平補強筋）を有するはりのせん断耐力は、せん断補強筋を持たないはりのせん断耐力より増加する。しかし、ディープビームにおけるせん断補強筋の補強効果は、スレンダーなはりほど有効的ではなく [1]、コンクリート標準示方書 [2] においては、ディープビームのせん断補強効果を考慮しないものとしている。

本研究では、水平補強筋の配置位置及び補強筋量、スターラップの補強筋量及び降伏強度、せん断スパン比を解析変数とした有限要素解析結果に基づき、ディープビームにおける水平補強筋及びスターラップのせん断補強効果の算定方法について検討する。

## 2. 解析の概要

### 2.1 有限要素解析プログラム

本研究で用いた非線形有限要素解析プログラムは、鉄筋コンクリートはりのせん断問題に対し開発されたものである [3]。本プログラムには、平均応力-平均ひずみ関係を採用した分散ひび割れモデルが用いられている。

### 2.2 解析供試体

本研究において、17体のはり供試体の解析を行った。解析供試体の諸元を表1に示す。供試体1-N-2.0、2-N-2.0、1-N-1.4及び1-N-0.7は、せん断補強筋を持たないはりである。供試体2-N-2.0、2L-N-2.0、2M-N-2.0及び2H-N-2.0は、水平補強筋量が等しく有効高さ( $d_2$ ：図1参照)が異なるものである。供試体1-1NY-2.0、1-2LY-2.0、1-2HY-2.0及び1-2NY-2.0は、せん断補強筋としてスターラップのみ有するものである。また、解析供試体1-2LY-2.0、1-2HY-2.0、1-2NY-2.0とスターラップ量及び降伏強度が等しくせん断スパン比のみ異なる供試体が、順に供試体1-2LY-1.4、1-2HY-1.4、1-2NY-1.4、及び供試体1-2LY-0.7、1-2HY-0.7、1-2NY-0.7であり、供試体名の数字2.0、1.4及び0.7がせん断スパン比の大きさを表している。本解析供試体において、引張補強筋の有効高さを270mm、はりの幅を150mm、コンクリート強度を35MPaと一定として解析を行っている。要素分割の一例を図2に示す。

\*1 北海道大学 助手 工学部土木工学科、工博（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）

表1 解析供試体の諸元

Specimen	a/d	Horizontal bar				Stirrup		Shear strength (kN)
		A <sub>1</sub> (cm)	A <sub>2</sub> (cm)	d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	P <sub>w</sub> (%)	f <sub>wy</sub> (MPa)	
1-N-2.0	2.04	10.13	-	27	-	-	-	109
2L-N-2.0	2.04	10.13	10.13	27	21	-	-	123
2M-N-2.0	2.04	10.13	10.13	27	15	-	-	121
2H-N-2.0	2.04	10.13	10.13	27	9	-	-	118
2-N-2.0	2.04	20.26	-	27	-	-	-	126
1-1NY-2.0	2.04	10.13	-	27	-	0.15	1000	143
1-2LY-2.0	2.04	10.13	-	27	-	0.30	300	134
1-2HY-2.0	2.04	10.13	-	27	-	0.30	400	142
1-2NY-2.0	2.04	10.13	-	27	-	0.30	1000	165
1-N-1.4	1.41	10.13	-	27	-	-	-	158
1-2LY-1.4	1.41	10.13	-	27	-	0.30	300	171
1-2HY-1.4	1.41	10.13	-	27	-	0.30	400	186
1-2NY-1.4	1.41	10.13	-	27	-	0.30	1000	207
1-N-0.7	0.74	10.13	-	27	-	-	-	194
1-2LY-0.7	0.74	10.13	-	27	-	0.30	300	200
1-2HY-0.7	0.74	10.13	-	27	-	0.30	400	205
1-NY-0.7	0.74	10.13	-	27	-	0.30	1000	209

A<sub>1</sub>:amount of lower horizontal bar, A<sub>2</sub>:amount of upper horizontal bar  
 d<sub>1</sub>:effective depth of lower horizontal bar, d<sub>2</sub>:effective depth of upper horizontal bar  
 p<sub>w</sub>:shear reinforcement ratio, f<sub>wy</sub>:yield strength

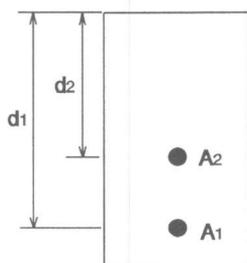


図1 有効高さの定義

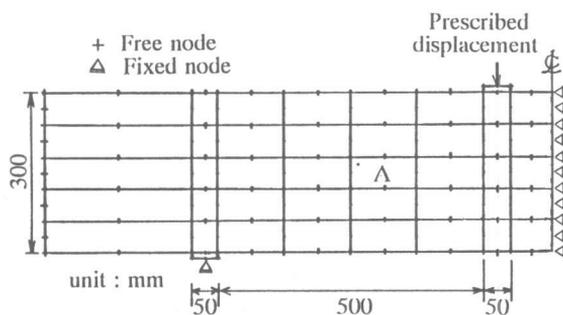


図2 要素分割図

### 3. 解析結果

#### 3.1 終局せん断耐力

解析供試体の終局せん断耐力は表1に示すとおりである。せん断補強筋を有するディープビームのせん断耐力は、せん断補強筋を持たないものに比べ増加する。水平補強筋量が等しい場合には、有効高さ $d_2$ が大きいほどせん断耐力が若干増加している。また、スターラップの降伏強度が大きいものほどせん断耐力が増加し、その傾向は、せん断スパン比が大きなものほど顕著に見られる。

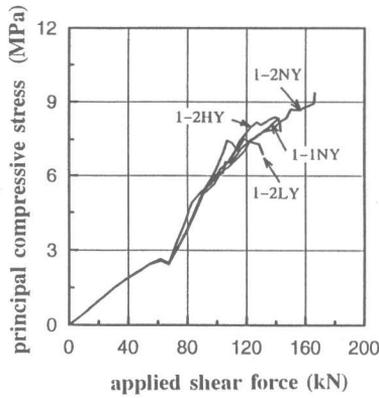


図3 主圧縮応力と作用せん断力との関係

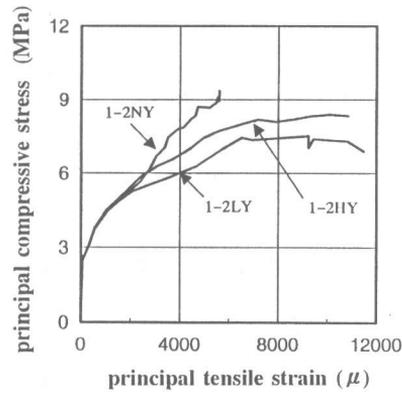


図4 主圧縮応力と主引張りひずみとの関係

### 3.2 ウェブコンクリートの圧縮応力

図3は、せん断補強筋としてスターラップのみ有する供試体1-1NY-2.0、1-2LY-2.0、1-2HY-2.0及び1-2NY-2.0のガウスポイントA（図2参照）での主圧縮応力と作用せん断力との関係を示す。作用せん断力に対する主圧縮応力の増加割合は、どの供試体においても概ね等しいことが明らかである。また、主圧縮応力の最大値は、終局せん断耐力が大きいものほど増加する傾向にある。

図4は、供試体1-1NY-2.0、1-2LY-2.0、1-2HY-2.0及び1-2NY-2.0の主圧縮応力と主引張りひずみとの関係を示す。主圧縮応力が等しい時の主引張りひずみは、スターラップの降伏強度が大きいものほど小さいことが明らかである。なお、本解析結果においては、供試体1-NY-0.7を除く供試体においてスターラップの降伏が観察されている。

ひび割れを有するコンクリートのひび割れ平行方向の圧縮耐力及び剛性は、ひび割れ直角方向の引張りひずみが大きいほど低下することが実験的に確認されている [4]。よって、スターラップによる補強量が多いものほど、また、降伏強度が大きいものほどひび割れ直角方向の変形を拘束し、その結果ウェブコンクリートの主圧縮応力を増加させるものと考えられる。また、水平補強筋量が多い場合にも同様の傾向が観察されており、せん断補強筋を有するディープビームのせん断耐力を考える場合、水平補強筋やスターラップの拘束効果によりウェブコンクリートの主圧縮応力がどの程度増加するものであるか定量的に明らかにする必要がある。

## 4. せん断耐力の評価

### 4.1 せん断耐荷モデル

コンクリート標準示方書 [2] におけるディープビームのせん断耐力式は、以下に示す二羽式 [5] に基づいたものである。

$$V = 0.24 f_c'^{1/3} (1 + \sqrt{100 p_s}) (1 + 3.33 r/d) b d / (1 + (a/d)^2) \quad (1)$$

ここに、 $f_c'$ ：コンクリートの圧縮強度(MPa)、 $p_s$ ：主鉄筋比、 $r$ ：載荷板幅、 $b$ ：はり幅、 $d$ ：有効高さ、 $a$ ：せん断スパンの長さ。

式(1)は、図5に示す簡略化されたタイドアーチモデルに基づいたものである。ウェブコンクリートに作用する圧縮応力 $D$ は、次式により計算される。

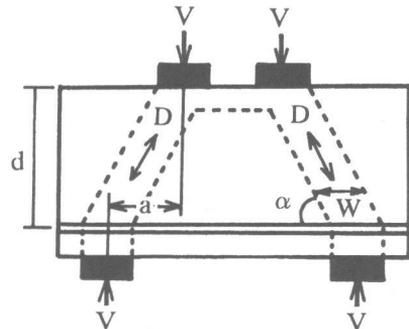


図5 タイドアーチモデル [5]

$$D = \sigma'_c b W \sin \alpha \quad (2)$$

ここに、 $\alpha$  : 引張補強筋の方向とアーチリブコンクリートの方向との角度、 $W$  : アーチリブの幅。  
圧縮力の垂直成分であるせん断力 $V$ は、次式で与えられる。

$$V = \sigma'_c b W \sin^2 \alpha = \sigma'_c b W / (1 + (a/d)^2) \quad (3)$$

ここで、アーチリブの幅は以下のように定義する。

$$W = 0.24d(1 + 3.33r/d) \quad (4)$$

せん断補強筋を有するディープビームにおいて、せん断補強筋はアーチリブコンクリートを拘束し、圧縮耐力を増加させることを前節で述べた。そこで、アーチリブの主圧縮応力を以下のように仮定する。

$$\sigma'_c = f'_c{}^{2/3} (1 + f(p_s)) g(a/d, p_w, f_{wy}) \quad (5)$$

ここに、 $p_w$  : スターラップの補強筋比、 $f_{wy}$  : スターラップの降伏強度。

本研究において、式(1)に水平補強筋及びスターラップのせん断補強効果を考慮することを考える。すなわち、式(5)における水平補強筋の補強効果を考慮する関数 $f(p_s)$ 、スターラップの補強効果を考慮する関数 $g(a/d, p_w, f_{wy})$ の定量化を、有限要素解析結果に基づき行う。ただし、本解析結果において、ウェブにおける主圧縮応力の分布形状は、水平補強筋及びスターラップの補強量によらず概ね等しいことが観察されており、アーチリブの幅 $W$ は、水平補強筋及びスターラップの補強量によらず一定と考えることとする。

図6は、主圧縮応力の最大値と水平補強筋の有効高さとの関係を示す。図5において、 $d_2=0$ に対する値は、1本の水平補強筋のみ有する供試体1-N-2.0に対するものである。主圧縮応力の最大値は、上側に配置した水平補強筋の有効高さ( $d_2$ )が大きいかほど増加することが明らかである。本研究では、主圧縮応力に影響を及ぼす水平補強筋量と有効高さの影響を、次式により表すこととした。

$$f(p_s) = \sqrt{100p_{s-e}} \quad (6)$$

$$p_{s-e} = \frac{A_{s-e}}{bd_1} \quad (7)$$

$$A_{s-e} = \sum_{i=1}^n A_i \left(\frac{d_i}{d_1}\right)^k \quad (8)$$

ここに、 $p_{s-e}$  : 等価主鉄筋比、 $d_i$  :  $i$ 段目の水平補強筋の有効高さ、 $d_1$  : 最下縁の水平補強筋の有効高さ、 $A_{s-e}$  : 等価引張補強筋量、 $k$  : 係数。なお、式(8)は、水平補強筋を有するはり部材のせん断耐力を単鉄筋はり部材に置き換えて考えることができると仮定したものであり、式中の係数 $k$ は、解析結果に基づき決定する。

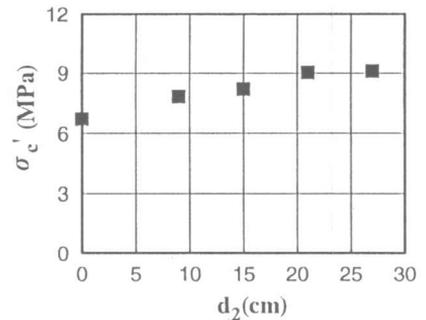


図6 主圧縮応力と有効高さとの関係

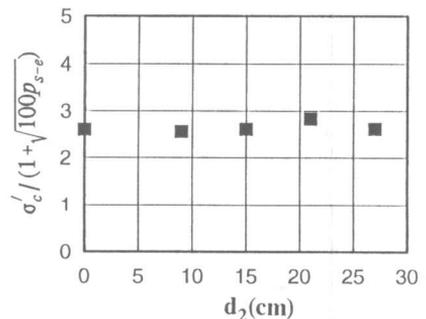


図7 主圧縮応力と有効高さとの関係

図7は、主圧縮応力を  $1+\sqrt{100p_{s-e}}$  で除した値と上側の水平補強筋の有効高さとの関係を示す。この場合、式(8)中の係数 $k$ の値を0.3としている。主圧縮応力を  $1+\sqrt{100p_{s-e}}$  で除した値は、異なる有効高さに対して概ね一定であり、式(8)中の係数 $k$ を0.3とすることにより水平補強筋量及び有効高さの影響を式(6)から(8)により評価できるものと言える。

図8は、主圧縮応力をせん断補強筋を持たないはりの主圧縮応力で除して正規化した主圧縮応力と  $p_w f_{wy}$  との関係を示す。正規化した主圧縮応力は、 $p_w f_{wy}$  が増加するにつれ大きくなる傾向にあると言える。ただし、その増加割合はせん断スパン比の大きさにより異なる。せん断スパン比が大きなものほど主圧縮応力の増加割合が大きく、せん断スパン比が0.74である場合には、ほとんど主圧縮応力の増加が無いものと言える。なお、3.2で述べたように本解析において、供試体1-NY0.7を除きスターラップの降伏が確認されており、スターラップによる補強効果を考える上でその降伏強度を用いることとした。

図9は、正規化した主圧縮応力とせん断スパン比との関係を示す。正規化した主圧縮応力は、せん断スパン比が0.74を原点とし、どの  $p_w f_{wy}$  に対しても直線的に増加すると考えることができる。そこで、せん断スパン比が0.74より小さい場合には、スターラップによるせん断補強効果が期待できないものとし、せん断スパン比が0.74から2.0の範囲に対し、次式を仮定することとする。

$$g(a/d, p_w f_{wy}) = 1 + 0.2(a/d - 0.74) \sqrt{p_w f_{wy}} \quad (9)$$

図8及び9における実線は、式(9)による予測値を示すが、予測値は解析値と概ね一致していると考えられる。

図10は、水平補強筋及びスターラップを有するデーブームの既往の実験 [6] [7] [8] により得られたせん断耐力と二羽式により計算されたせん断補強筋が無い場合のせん断耐力の比とせん断スパン比との関係を示す。すべてのデータに対し、耐力比は1.0を上回っており、せん断補強筋の補強効果が存在することが明らかである。この場合、全データに対する耐力比の平均は1.35（変動係数14.1%）であった。

一方、図11は、既往実験結果と式(3)~(9)により計算されたせん断耐力比とせん断スパン比との関係を示す。この場合、せん断耐力比の平均は、1.14（変動係数9.4%）であり、概ね耐力を評価できていると言える。ただし、せん断スパン比が1.0から1.5の範囲で、 $a/d$ が小さいほど耐力比が小さくなる傾向が若干観察される。本論文で提案したせん断耐力式において、せん断スパン比の大きさによるスターラップの補強効果の違いを式(9)により考慮しているが、的確にその傾向を表現できていない可能性がある。また、本研究では、どのような理由でせん断スパン比の大きさによりスターラップの補強効果が異なるのかを明らかにすることができず、今後、実験及び解析的な検討をさら

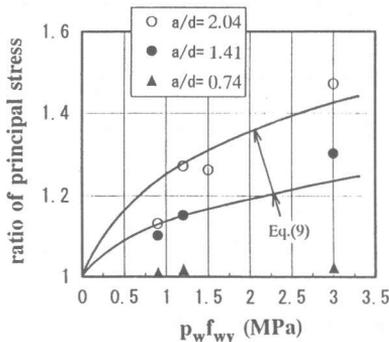


図8 正規化した主圧縮応力と  $p_w f_{wy}$  との関係

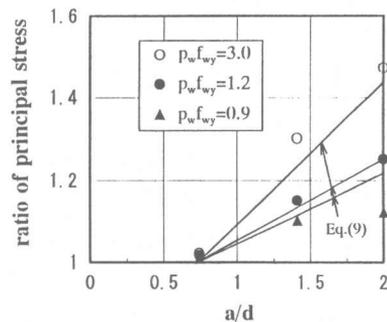


図9 正規化した主圧縮応力とせん断スパン比との関係

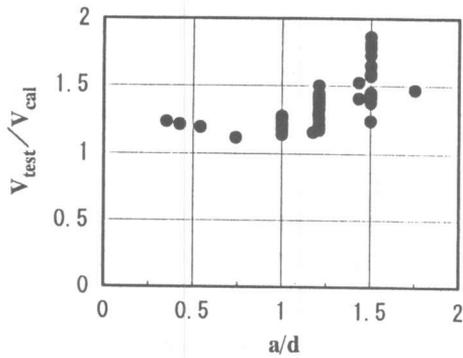


図10 せん断耐力比とせん断スパン比との関係

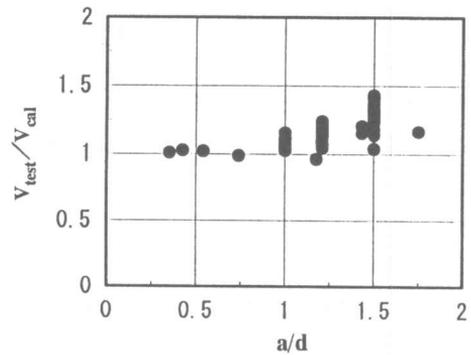


図11 せん断耐力比とせん断スパン比との関係

に進めていく必要があると言える。さらに、スターラップの補強量が多くスターラップが降伏しない場合や、スターラップに連続繊維補強材を用いた場合には、降伏強度もしくは破断強度を基準としてせん断補強効果を考えることには無理があり、この点に関する検討も今後の課題である。

## 5. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な知見を以下に示す。

- (1)水平補強筋を有するディープビームのせん断耐力は、水平補強筋を持たないはりに比べ増加することが解析的に示された。
- (2)スターラップを有するディープビームのせん断耐力は、スターラップを持たない場合に比べ増加することが解析的に示された。その補強効果は、スターラップの降伏強度と補強筋比を掛け合わせた値が大きいほど、また、せん断スパン比が大きくなるほど大きい。
- (3)せん断補強筋を持たないディープビームに対するせん断耐力式（二羽式）に水平補強筋及びスターラップの影響を考慮することにより、そのせん断耐力を概ね評価できることが示された。

## 参考文献

- 1)林川俊郎・斉藤文彦・角田與史雄：せん断補強筋を有するRCディープビームの強度について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.2、pp.319-324、1990
- 2)コンクリート標準示方書（平成3年版）設計編、土木学会
- 3)ナレス パンタラトーン：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（博士論文）、1991
- 4)宮原長久・川上泰司・前川宏一：ひび割れを含む鉄筋コンクリート板要素の一軸圧縮下における非線形挙動、土木学会論文集、No.378/V-6、pp.249-258、1987
- 5)二羽淳一郎：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、JCI、pp.119-126、1983
- 6)古内仁・児玉豊治、角田與史雄：鉄筋コンクリートディープビームのせん断補強に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.2、pp.333-338、1987
- 7)de Paiva, H. A. Rawdon and Siess, Chester P. : Strength and Behavior of Deep Beams in Shear, Proc. of ASCE, Vol.91, ST5, pp.14-41, 1965
- 8)Kong, F. K., Robins, P. J. and Cole, D. F. : Web Reinforcement Effects on Deep Beams, ACI Journal, Vol.67, No.12, pp.1010-1017, 1970