

# 論文 RC はり腹部に配置した軸方向鉄筋のせん断補強効果

長友 克寛\*1・角 徹三\*2・春本 繁\*3・松原 三郎\*4

**要旨：**本研究は、長方形断面をもつ RC はりの腹部に配置した部材軸方向の補強筋が、どの程度せん断耐力の向上に寄与するかを実験的に検討したものである。部材軸方向の補強筋としては、溶接金網の横筋および D6 水平鉄筋を対象とした。

実験結果より、溶接金網の横筋のせん断補強効果は、鉛直スターラップのみを配置した場合とほぼ同等であること等を明らかにした。さらに、この結果に基づき、部材軸方向補強筋を含むせん断補強筋の補強効果を評価するためのパラメータについて提案した。

**キーワード：**せん断耐力、RC はり、軸方向鉄筋、スターラップ、修正圧縮場理論

## 1. はじめに

斜めひび割れ発生後における RC はりのせん断抵抗に占める骨材のかみ合い効果や補強筋のだば作用が大きいものであることは、既に指摘されている<sup>1)</sup>。特に、骨材のかみ合いについては、せん断破壊モードに影響を及ぼすという報告もある<sup>2)</sup>。従って、斜めひび割れの成長や開口を適切に制御することおよびそのための補強筋の効果を正確に把握することは、せん断耐力および変形評価の両面から重要な課題である。

通常、RC はりの腹部に配置される軸方向の補強筋は、ねじりモーメントに対する補強筋や乾燥収縮ひび割れのための用心鉄筋として用いられることが多い。しかし、軸方向補強筋は 1 本で複数の斜めひび割れを拘束することができる。しかも、補強筋軸に沿うコンクリートの割裂が生じ難いため、だば作用も保持し易い<sup>3)</sup>。従って、これらのことは、腹部軸方向補強筋のせん断補強効果が期待できる根拠となる。

腹部軸方向補強筋の効果については、近年注目されている修正圧縮場理論においても、平均ひび割れ間隔と平均主引張歪みとを介してひび割れ面での骨材のかみ合いせん断応力として評

価され、さらにこのせん断応力が平均主引張応力に考慮される形でせん断抵抗に取り入れられている<sup>4)</sup>。

一方、現行の土木学会コンクリート標準示方書の規定では、これら斜めひび割れ面を介してのせん断伝達作用は、主鉄筋比や有効高さをパラメータとして、コンクリートの負担せん断力の中に含めて評価されている。従って、腹部の軸方向補強筋については考慮されていない。

本研究は、より効率的なせん断補強法の確立を念頭におき、RC はり腹部に配置される部材軸方向の補強筋がもっと積極的に有効利用できないかということについて、その可能性を探ることを目的としている。

## 2. 実験概要

表-1 に実験概要、表-2 に使用鋼材の力学的性質を示す。軸方向せん断補強筋としては、溶接金網の横筋および D6 水平鉄筋を対象とした。実験変数は、試験体のせん断補強方法(溶接金網、水平鉄筋、鉛直スターラップ)およびはり高さ( $h=200\text{ mm}$  および  $300\text{ mm}$ )である。

以下では、溶接金網の横筋および水平鉄筋を

\*1 高松工業高等専門学校 建設環境工学科 博士(工学)(正会員)


\*2 豊橋技術科学大学 工学部 建設工学系 工博(正会員)

\*3 高松工業高等専門学校 建設環境工学科 工修

\*4 高松工業高等専門学校 建設環境工学科

表-1 実験概要

試験体名*1	圧縮強度 fc' (MPa)	引張強度 ft (MPa)	破壊時せん断力実験値 Vuexp.(kN)	せん断耐力 計算値*2 Vucal.(kN)	$\frac{Vucal.}{Vuexp.}$	せん断 スパン比 a/d	破壊形式
L0-0	28.5	2.5	24.39	31.63	1.30	2.50	せん断
LM75-2.6	29.5	2.7	48.44	39.90	0.82		
LM75-3.2	28.5	2.5	51.94	46.73	0.90		
LM50-2.6	29.5	2.7	52.03	49.16	0.94		
LM50-3.2	29.5	2.7	55.48	54.28	0.98		
L150-80			69.05	64.04	0.93	1.67	せん断
L150-0	28.5	2.5	51.06	60.44	1.18	2.50	曲げ引張
L90-0			51.57	86.71	1.68		
H0-0	31.7	2.8	34.36	45.66	1.33	2.14	せん断
HM100-2.6	30.8	2.2	46.07	48.92	0.94		
HM100-3.2			65.28	56.60	0.87		
HM75-2.6			56.37	55.02	0.98		
HM50-2.6	31.7	2.8	71.76	68.48	0.95		
H0-90			46.39	52.33	1.13		曲げ引張 せん断

\*1 LM50-2.6  


\*2 修正圧縮場理論による計算値  
 (断面内における主応力分布は一樣と仮定)

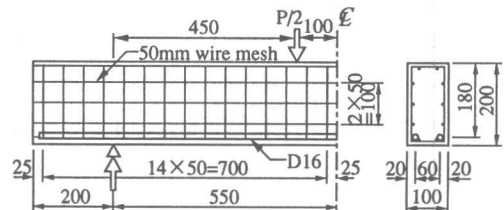
表-2 使用鋼材の性質

使用鋼材	断面積 A (mm <sup>2</sup> )	降伏応力 fy (MPa)	弾性係数 Es (GPa)
主鉄筋(D16)	19.86	371	190
スターラップ(D6)	31.67	404	189
溶接金網	径 2.6 mm 5.11 径 3.2 mm 7.55	427*	215

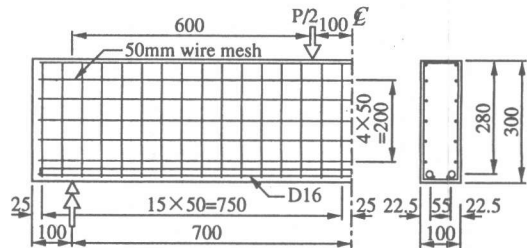
\* 2000 $\mu$  歪み時の応力度を表示

横筋、溶接金網の縦筋および鉛直スターラップを縦筋と総称して記す。さらに、はり高さ  $h = 200$  mm の場合を L シリーズ、 $h = 300$  mm の場合を H シリーズと記す。

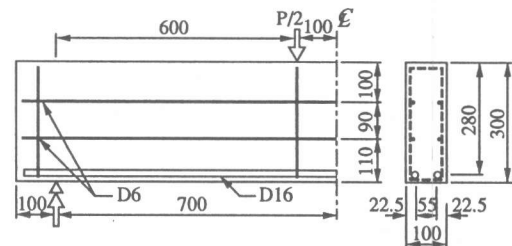
図-1 に代表的な試験体の形状・寸法を示す。試験体は、幅 100 mm の長方形断面をもつ単純はりである。主鉄筋には D16、水平鉄筋および鉛直スターラップには D6、溶接金網には 3 種類のメッシュ間隔 (50, 75, 100 mm) および 2 種類の径 (2.6, 3.2 mm) のもの、をそれぞれ用い



(a) LM50-2.6



(b) HM50-2.6



(c) H0-90

図-1 試験体の形状・寸法

た。各せん断補強筋は、閉鎖型に加工して配置した。

荷重は対称 2 点載荷とし、はりが破壊に至る

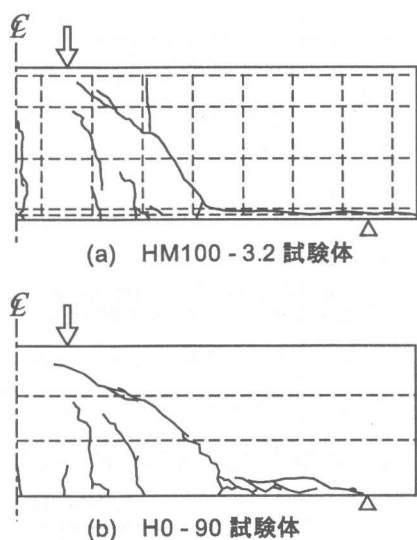


図-2 破壊時のひび割れ状況の例

まで単調に増加させた。せん断スパン比は、Lシリーズが2.50，Hシリーズが2.14である。ただし、試験体L150-0が曲げ引張破壊を生じたため、試験体L150-80のみ1.67に変更した。

### 3. 実験結果

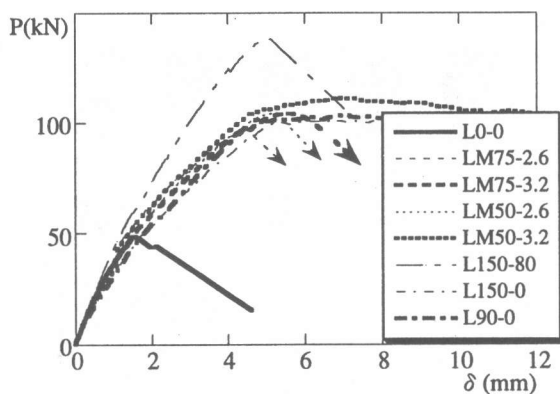
#### 3.1 破壊形式

図-2に代表的な試験体の破壊時におけるひび割れ状況を示す。

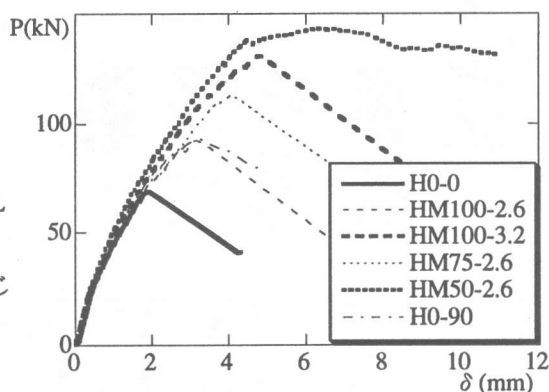
せん断補強筋の無い場合は、せん断引張破壊を生じた。溶接金網を用いた場合は、メッシュ間隔が広く、径が細いものはせん断引張破壊を生じ、メッシュ間隔が狭く、径が太くなるのに伴ってせん断引張とせん断圧縮の複合破壊、さらには曲げ引張破壊へと移行していった。腹部水平鉄筋のみを配置した場合は、せん断引張破壊を生じ、鉛直スターラップを併用すると、せん断引張とせん断圧縮の複合破壊を生じた。

主斜めひび割れの角度は、LおよびHシリーズの場合、それぞれ平均で $45.1^\circ$ および $43.9^\circ$ であった。このひび割れ角度に及ぼす補強方法の違いの影響は明確ではなかった。

図-3に荷重 $P$ —中央たわみ $\delta$ 関係を示す。せん断補強筋量の増加に伴い、脆性的なせん断破壊から靱性的な曲げ引張破壊へと移行する様



(a) Lシリーズ ( $h=200\text{mm}$ )



(b) Hシリーズ ( $h=300\text{mm}$ )

図-3 荷重 $P$ —中央たわみ $\delta$ 関係

子がよく現れている。

#### 3.2 破壊時せん断力の負担比率

破壊時の作用せん断力を $V_u$ ，それに抵抗するコンクリート，縦筋，および横筋の各負担せん断力をそれぞれ $V_c$ ， $V_s$ 縦筋， $V_s$ 横筋と表示する。

図-4はこれら各要素の負担せん断力比率を示している。縦筋と横筋とを併用する場合、各要素の負担せん断力を単純に重ね合わせることが可能か否かは不明である。そこで、今回は便宜的に $V_c$ をせん断補強筋のない試験体(L0-0，H0-0)のせん断耐力で、 $V_s$ 縦筋を $45^\circ$ トラス理論でそれぞれ評価し、残りを $V_s$ 横筋とした。

同図から分かるように、多くの試験体において横筋、すなわち腹部軸方向補強筋の負担せん断力は20%を超えており、注目に値する。

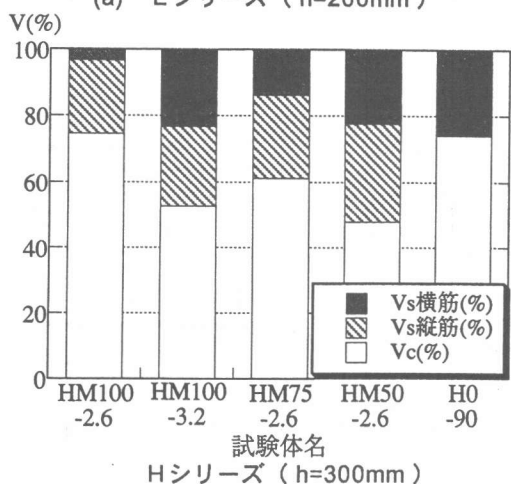
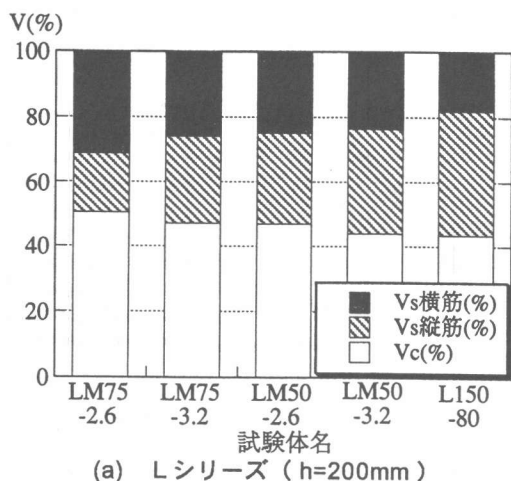


図-4 破壊時せん断力の負担比率

### 3.3 せん断補強筋の補強効果

次に、横筋を含めたせん断補強筋の効果を評価するためのパラメータについて考察する。

いま、主斜めひび割れ面の面積に対するその面へのせん断補強筋の投影面積比を  $ps(\theta)$  とすると、それは次式で表される。

$$ps(\theta) = \frac{1}{b} \left( \frac{A_v}{S_v} \cos^2 \theta + \frac{A_h}{S_h} \sin^2 \theta \right) \quad (1)$$

ここに、 $\theta$  は主ひび割れ面の角度、 $b$  ははり幅、 $S_v$ 、 $S_h$  は縦筋および横筋の間隔、 $A_v$ 、 $A_h$  は1組の縦筋および横筋の断面積である。

式(1)において  $\theta = 0^\circ$  とした場合、すなわち  $ps(\theta = 0^\circ)$  は慣用的な鉛直スタースラップのせん断補強筋比に一致する。以下では、3.1の結果に基づき面積比  $ps(\theta = 45^\circ)$  を採用する。

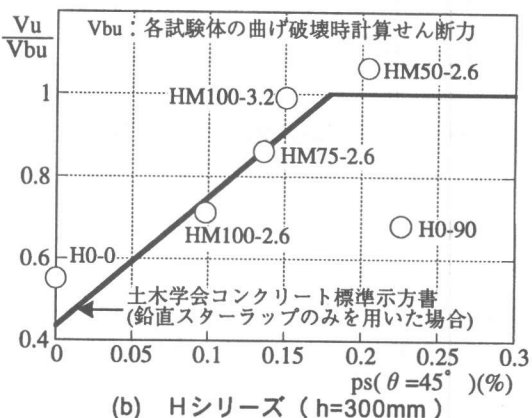
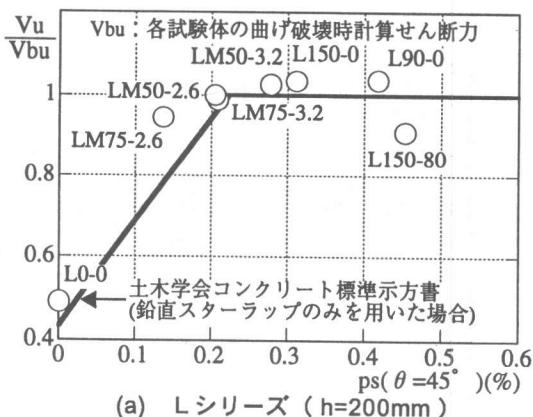


図-5 破壊時せん断力比-補強筋面積比関係

なお、補強パラメータは、厳密には歪み勾配や補強筋位置等の関数となる筈であるが、現時点では簡単のため  $ps(\theta)$  を用いることにした。

図-5に破壊時せん断力比  $V_u/V_{bu}$  とせん断補強筋面積比  $ps(\theta = 45^\circ)$  との関係を示す。ここに  $V_{bu}$  は、各試験体に対して計算で求めた曲げ耐力時のせん断力である。図中の実線は、土木学会コンクリート標準示方書の規定に基づきせん断耐力および上述の  $V_{bu}$  を計算し (安全係数は全て 1.0 とした)、両者の小さい方の値を破壊時の計算せん断力として描いたものである。

同図において、溶接金網または鉛直スタースラップを用いて補強した場合、実験結果はほぼ計算で得られた実線上にある。このことから、溶接金網の横筋のせん断補強効果は鉛直スタースラップのそれに近いこと、および溶接金網のせん断補強効果は補強筋面積比  $ps(\theta = 45^\circ)$  と示方書に基づく耐力時のせん断力とを組み合わせる

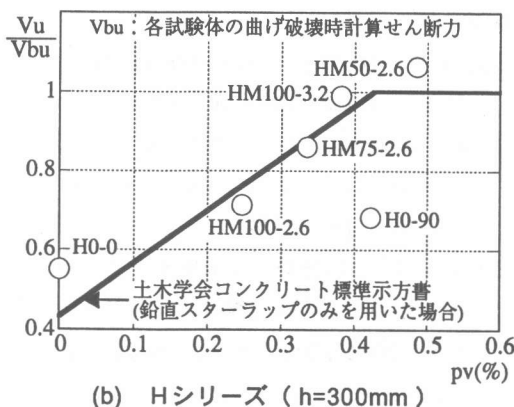
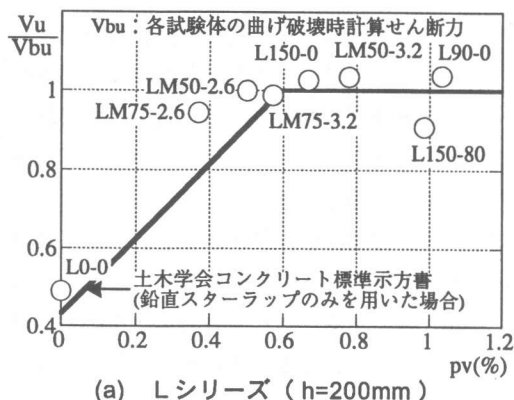


図-6 破壊時せん断力比-補強筋体積比関係

ことにより評価できること、の2つが分かる。

一方、せん断補強筋としてD6水平鉄筋のみを使用した場合(試験体 H0-90)、 $V_u/V_{bu}$  の値は約0.7であり、 $ps(\theta=45^\circ)$  がほぼ同じ他の試験体と比較してかなり低下している。このことから、横筋は、同一断面積であれば溶接金網のように径の細い鉄筋を断面内に分散させた方がせん断補強効果が高くなる可能性が考えられる。

図-6に破壊時せん断力比  $V_u/V_{bu}$  とせん断補強筋体積比  $p_v$  との関係を、参考までに示す。ここに  $p_v$  は、せん断スパン体積に対する同スパン内に配置されているせん断補強筋体積の比を表している。同図中の実線も、示方書のせん断耐力式および曲げ耐力式から破壊時のせん断力を計算して描いたものである。

同図においても、実験結果はほぼ計算で求めた実線上にあり、せん断補強筋の体積の面から見ても、溶接金網は鉛直スターラップと同等の

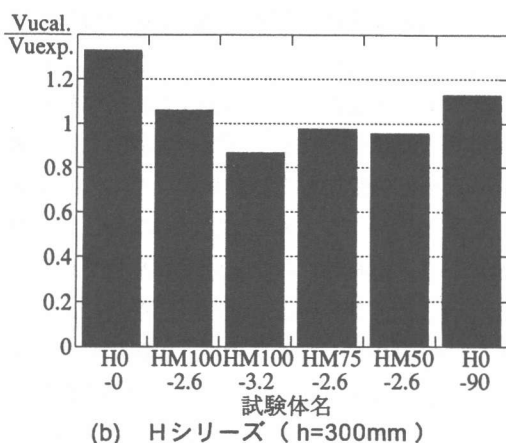
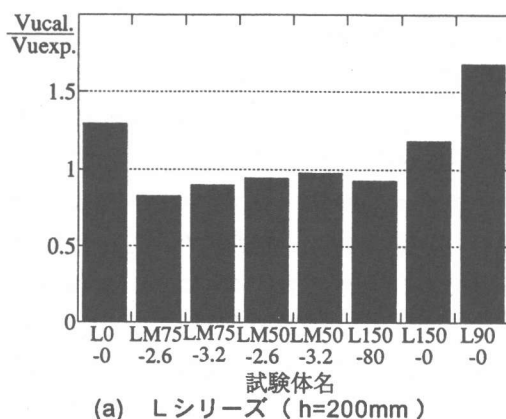


図-7 修正圧縮場理論による計算値と実験値との比較

せん断補強効果のあることがうかがえる。

図-5, 6において、軸方向鉄筋を配置した場合の曲げ耐力そのものは、鉛直スターラップのみを用いる場合よりも当然増加している。加えて軸方向補強筋には、乾燥収縮ひび割れの抑制効果なども期待できる。従って、溶接鉄筋網の利用や、鉛直スターラップが過密になり過ぎる場合における軸方向鉄筋の併用について、もう少し積極的な検討が必要であると思われる。

#### 4. 修正圧縮場理論によるせん断耐力評価

次に、腹部に軸方向鉄筋を有するRCはりでのせん断耐力について、修正圧縮場理論による解析的評価を試みる。

RC部材のせん断耐力を解析的に評価する方法としては、Collins 等<sup>4)</sup>、中村等<sup>5)</sup>の修正圧

縮場理論、鈴木等<sup>6)</sup>の終局つり合い法、二羽等<sup>7)</sup>の格子モデル等が提案されている。今回は、斜めひび割れ面での骨材のかみ合いを計算に考慮できる修正圧縮場理論を用いることにした。

解析では、曲げモーメントおよび配筋の非対称性の影響は無視し、断面内での主応力分布は一樣であると仮定した。これは、今回の実験におけるせん断スパン比が小さいこと、同一せん断スパン比での相対的な計算せん断耐力の比較を第一の目的としたこと、および横筋の存在によってある程度は断面内における応力の再分配と均一化とが期待できること、の3つによる。

図-7に各試験体毎の実験値  $V_{uexp}$  に対する解析値  $V_{ucal}$  の比を示す(表-1参照)。同図より、横筋を配置した試験体のうちせん断破壊したものに關するせん断耐力比は0.82~1.13の間にあり、解析的にはある程度実験値を再現できていることが分かる。ただし、解析における破壊時の斜めひび割れ角度は、実験で観察されたものよりもかなり小さく、多くの要因が重なり合ってこのような比較的良好な一致をみたと考えられる。この点については、さらに検討が必要である。

一方、せん断補強筋の無い試験体については、解析値の方が実験値よりも大きくなっている。これは、実験では斜めひび割れの成長が抑制されず急激に破壊へと至るのに対して、解析ではウェブ内における平均主引張応力度が引張強度に達した時点を破壊とみなすためである。

## 5. 結論

本研究では、RCはり腹部に配置した軸方向鉄筋のせん断耐力への補強効果を実験的に検討した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 溶接金網の横筋は鉛直スターラップと同等のせん断補強効果をもつ。
- (2) RC腹部に配置する軸方向鉄筋は、同一断面積であれば溶接金網のように分散させて配置した方がせん断補強効果が高い。
- (3) 溶接金網の補強効果は、主ひび割れ面に

対するその面への補強筋の投影面積比、およびコンクリート標準示方書の規定に基づく計算曲げ耐力時のせん断力に対する計算せん断耐力の比、という2つのパラメータによって評価できる。

- (4) RC腹部に軸方向鉄筋を配置した場合のせん断耐力は、断面内における主応力分布が一樣であるとした簡易的な修正圧縮場理論によって、ある程度評価が可能である。

## 参考文献

- 1) Taylor, H. P. J. : Investigation of Forces Carried across Cracks in Reinforced Concrete Beams in Shear by Interlock of Aggregate : Cement and Concrete Association, TRA 42.447, 22pp., 1970
- 2) 李 棹允・渡邊史夫：破壊モードに基づくRC梁のせん断強度理論，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 2, No. 2, pp.785-790, 1996
- 3) 鈴木基行・中村泰介・堀内 信・尾坂芳夫：軸方向鉄筋のダウエル作用に及ぼす引張力の影響に関する実験的研究，土木学会論文集，No.426/V-14, pp.159-166, 1991.2
- 4) Collins, M. P. et al. : A General Shear Design Method, ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 1, pp. 36-45, Jan. / Feb. 1996
- 5) 中村 光・檜貝 勇：拡張した修正圧縮場理論によるRCはり断面のせん断耐荷力評価，土木学会論文集，No.490/V-23, pp.157-166, 1994.5
- 6) 鈴木基行・姜 錫和・尾坂芳夫：せん断補強筋を有する鉄筋コンクリートばりのせん断耐力評価に関する解析的研究，土木学会論文集，No. 426/V-14, pp. 111-120, 1991.2
- 7) 二羽淳一郎・崖 益暢・田辺忠顕：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究，土木学会論文集，No. 508/V-26, pp.79-88, 1995.2