

## 論文 溶接金網により補強した RC はりのせん断耐力

中村 知子\*1・長友 克寛\*2・角 徹三\*3・藤井 栄\*4

**要旨:**本研究は、溶接金網をせん断補強筋として用いた場合のRCはりの力学的挙動を実験的に考察するとともに、そのせん断補強効果の評価方法について検討したものである。主な実験変数は、溶接金網の縦筋・横筋間隔、金網径およびせん断スパン比の3つである。

実験結果より、まず、既往の研究で提案したせん断補強筋面積比が同じ場合、上記の変数が変化した場合に対しても、溶接金網は鉛直スターラップと同等以上のひび割れ分散性およびせん断補強効果をもつこと等を明らかにした。次に、溶接金網のせん断補強効果の評価方法を提案し、実験値を良好な精度で推定可能であることを確認した。

**キーワード:** RCはり, せん断耐力, 溶接金網, 修正圧縮場理論

## 1. はじめに

RCはりの腹部に配置された部材軸方向補強筋には、そのだぼ作用に加えて斜めひび割れ面の開口を抑制することに伴う骨材のかみ合い抵抗の保持が期待できる。

著者等<sup>1)</sup>は、このような認識のもと、部材軸方向補強筋として水平スターラップおよび溶接金網の横筋を取り上げ、これらがはりのせん断補強筋としてどの程度の効果があるのかを実験的に検討した。そして、RCはりの破壊時における溶接金網の横筋のせん断力負担率は縦筋のそれに近いものであること、同じ補強筋量であれば溶接金網と鉛直スターラップとはほぼ同等のせん断補強効果を持つこと等を明らかにした。さらに、この結果に基づき、せん断補強筋としての溶接金網あるいは溶接鉄筋網の有効性を指摘し、併せてこれらで補強したRCはりのせん断耐力算定法の試案を提案した。

溶接金網や溶接鉄筋網は、工場製作が可能であるため品質や組立寸法の管理が容易である。加えて、組立工程が簡略化出来るため、現場での省力化と施工時間の短縮化も期待できる。

今回、この研究の一環として、特に溶接金網に焦点を絞り、金網の縦筋と横筋間隔およびせん断スパン比の2つを新たな実験変数とした追加実験を行った。本論文は、これらの変数がRCはりのせん断補強効果に及ぼす影響を検討するとともに、上記のせん断耐力の算定方法について詳細に検証したものである。

## 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。主な実験変数は、溶接金網の縦筋間隔 $S_v$ および横筋間隔 $S_h$  (50, 75, 100mm)、せん断スパン比 $a/d$  (2.14, 2.50, 3.64, 4.00)、金網径 $\phi$  (2.6, 3.2mm) およびはり高さ $h$  (200, 300mm)である。

図-1に代表的な試験体の形状・寸法を示す。試験体は、幅 $b=100\text{mm}$ の長方形断面をもつ単純はりである。主鉄筋には、D16 ( $a/d=2.14$  および  $2.50$  の場合) または D22 ( $a/d=3.64$  および  $4.00$  の場合) をそれぞれ2本用いた。溶接金網には、3種類の正方形メッシュ ( $S_v \times S_h = 50 \times 50, 75 \times 75, 100 \times 100\text{mm}$ )、および2種類の

\*1 高松工業高等専門学校専攻科 建設工学専攻 (正会員)

\*2 高松工業高等専門学校 建設環境工学科 博士 (工学) (正会員)

\*3 豊橋技術科学大学 工学部 建設工学系 工博 (正会員)

\*4 京都大学大学院 環境地球工学専攻 博士 (工学) (正会員)

表-1 実験概要

試験体名*	主鉄筋	せん断 スパン比 a/d	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 Vucal.(kN)	Vucal. Vuexp.	破壊形式
L0-0-0-2.5	2-D16	2.50	28.5	2.5	24.39	21.48	0.88	せん断
L2.6-75-75-2.5			29.5	2.7	48.44	33.36	0.69	
L3.2-75-75-2.5			28.5	2.5	51.94	40.11	0.77	
L2.6-50-50-2.5			29.5	2.7	52.03	41.06	0.79	
L3.2-50-50-2.5			55.48	51.46	0.93	曲げ引張		
H0-0-0-2.1	2-D16	2.14	31.7	2.8	34.36	27.37	0.80	せん断
H2.6-100-100-2.1			30.8	2.2	46.07	43.09	0.94	
H3.2-100-100-2.1			65.28	52.04	0.80			
H2.6-100-100-4.0	2-D22	4.00	28.9	2.7	44.62	48.23	1.08	
H2.6-75-75-2.1	2-D16	2.14	30.8	2.2	56.37	49.46	0.88	
H2.6-75-75-3.6	2-D22	3.64	28.9	2.7	53.39	54.06	1.01	
H2.6-50-50-2.1	2-D16	2.14	31.7	2.8	71.76	61.63	0.86	曲げ引張
H2.6-100-50-2.1			53.11		52.92	1.00	せん断	
H2.6-50-100-2.1			64.90		51.28	0.79	曲げ引張	
H3.2-50-100-2.1			70.87		63.60	0.90		
H2.6-100-50-4.0	2-D22	4.00	26.2	2.7	58.37	56.07	0.96	せん断
H2.6-50-100-4.0					67.46	55.37	0.82	曲げ引張

\*H2.6-100-50-2.1

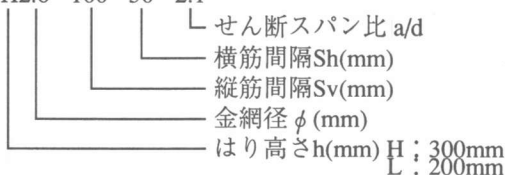


表-2 使用鋼材の性質

使用鋼材	断面積 As (mm <sup>2</sup> )	降伏応力 fy (MPa)	弾性係数 Es (GPa)
主鉄筋 (D16)	198.6	371	190
主鉄筋 (D22)	387.1	369	182
溶接金網(径2.6mm)	5.11	425*	214
溶接金網(径3.2mm)	7.55	415*	208

\* 2000μ歪み時の応力度を表示

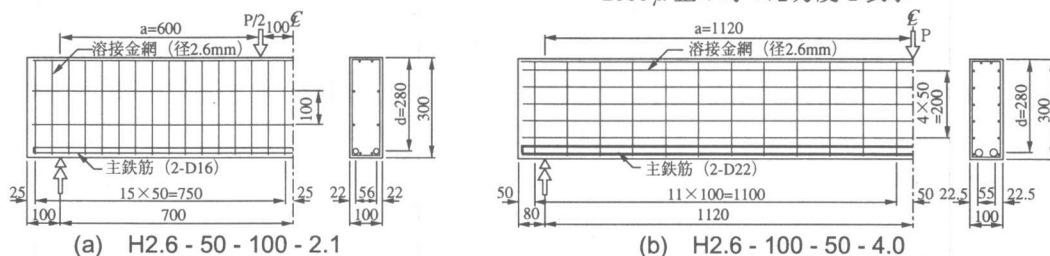


図-1 代表的な試験体の形状・寸法(単位mm)

長方形メッシュ (Sv × Sh = 50 × 100, 100 × 50 mm) のものを用いた。長方形メッシュの金網は、正方形メッシュの金網の縦筋または横筋を1本おきに切断し、除去することによって作製した。また、各溶接金網は、上部が重なるように閉鎖型に曲げ加工し、結束線を用いて結合した。

荷重は対称2点载荷とし、はりが破壊に至るまで単調に増加させた。ただし、a/d = 4.00の試験体のみ中央1点载荷とした。

### 3. 実験結果の概要

#### 3.1 破壊性状

図-2 にせん断破壊した試験体の破壊時にお

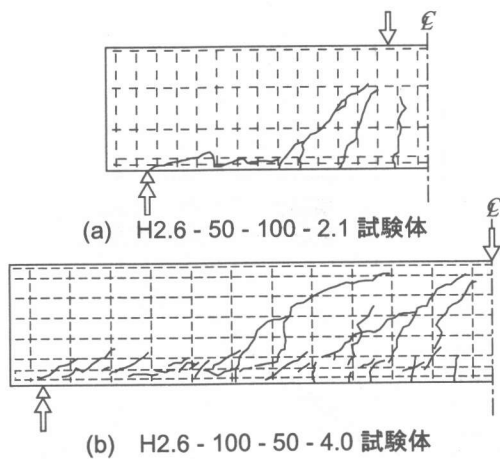


図-2 破壊時のひび割れ状況の一例

けるひび割れ状況の一例を示す。せん断補強筋の無い場合は、斜め引張破壊を生じた。溶接金網を配置した場合は、メッシュ間隔が狭く、径が太くなるのにつれて、せん断引張破壊から曲げ引張破壊へと移行していった。

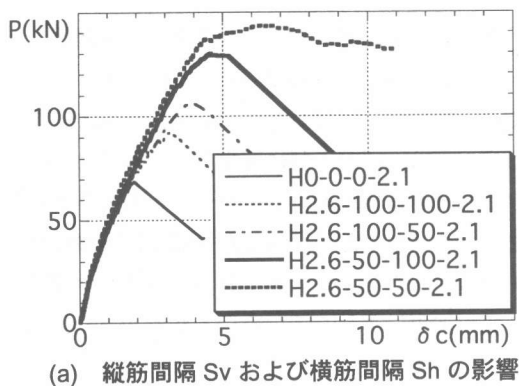
### 3.2 荷重 P-中央たわみ $\delta c$ 関係

図-3 に荷重 P-中央たわみ  $\delta c$  関係を示す。同図 (a) はせん断スパン比 ( $a/d=2.14$ ) および金網径 ( $\phi=2.6$  mm) が一定の場合について、溶接金網のメッシュ間隔 (縦筋間隔と横筋間隔) の影響を見たものである。メッシュ間隔が狭くなるに従って、最大荷重およびその時の変位は増大する。初期の荷重たわみ剛性へのメッシュ間隔の影響はそれほど明確では無い。

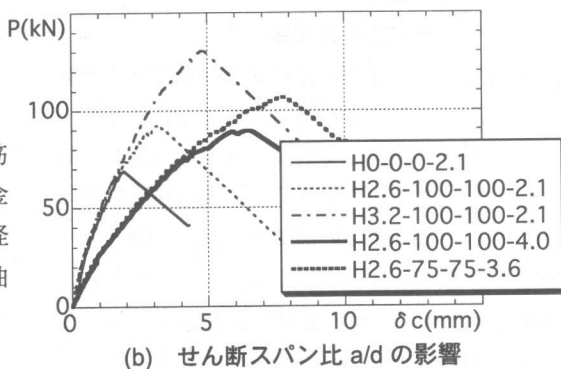
同図 (b) は正方形メッシュの溶接金網の場合について、せん断スパン比  $a/d$  の影響を見たものである。せん断スパン比が大き (細線から太線) になると変形剛性は小さくなるが、同じ補強筋量であれば (細点線と太実線) 最大荷重はほとんど変わっていない。

### 3.3 ひび割れの分散性

図-4 には 1 m あたりの平均ひび割れ本数  $ncr$  とせん断補強筋面積比  $ps$  の関係を示す。ひび割れは、破壊時にはり高さの 1/2 以上にまで成長したものを対象とした。また、 $ps$  は 4.1



(a) 縦筋間隔  $S_v$  および横筋間隔  $S_h$  の影響



(b) せん断スパン比  $a/d$  の影響

図-3 荷重 P-中央たわみ  $\delta c$  関係

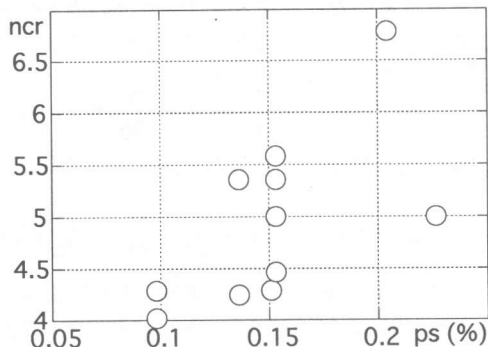
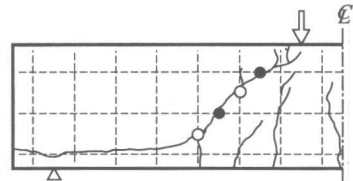


図-4 平均ひび割れ本数  $ncr$ -せん断補強筋面積比  $ps$  関係

で後述する。溶接金網のメッシュ間隔が狭くなり  $ps$  が増加するのに伴い、 $ncr$  は増加する傾向にあり、このことは平均ひび割れ間隔が小さくなることを意味している。なお、図示してはいないが、既往の研究も含めて、同じ  $ps$  であれば、鉛直スターラップのみを配置した場合よりも溶接金網を配置した方がわずかに  $ncr$  は大きくなり、従って平均ひび割れ間隔は狭くなった。

### 3.4 せん断力 V-溶接金網歪 εw 関係

図-5に、試験体 H3.2-100-100-2.1 についてせん断力 V-溶接金網歪 εw 関係を示す。ここに εw は、同図上部に図示したように主斜めひび割れ面近傍に貼付した歪ゲージの読みより求めた。はり上部に配置した横筋も、破壊時近くではかなり εw が大きくなっており、ひび割れ面の拘束に寄与していることが分かる。



● : 横筋ゲージ位置 (背面側)  
○ : 縦筋ゲージ位置 (正面側)

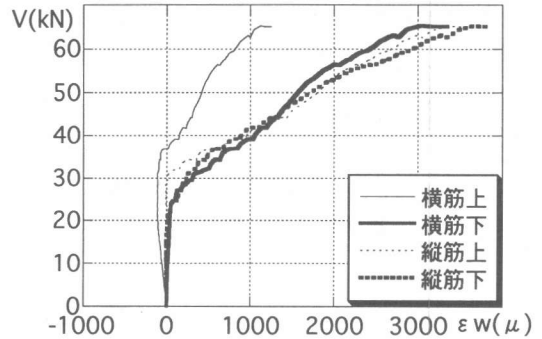


図-5 せん断力 V-溶接金網歪 εw 関係  
(試験体 H3.2-100-100-2.1 の場合)

## 4. せん断耐力

### 4.1 算定方法の提案

著者等<sup>1)</sup>は、腹部の部材軸方向補強筋を考慮した RC はりのせん断耐力の算定方法として、以下の方法を提案している。まず、角度 θ の斜めひび割れ面とそれを横切る腹部補強筋を考える。斜めひび割れ面の面積を Acr、この面への腹部補強筋の投影面積を Awp とし、両者の比 Awp/Acr を新たにせん断補強筋面積比 ps(θ) として、次式で定義する。この変数を導入したのは、腹部軸方向補強筋によるせん断耐力増加が主としてそのだば作用とひび割れ面の拘束によるものである、との考えに基づいている。

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

実験結果を参考にして、 $\theta \doteq 45^\circ$  とすると、

$$ps(\theta = 45^\circ) \equiv ps = \frac{1}{2 \cdot b} \cdot \left( \frac{A_v}{S_v} + \frac{A_h}{S_h} \right) \quad (2)$$

ここに、Av、Ah：1組の鉛直筋(縦筋)および水平筋(横筋)の断面積。鉛直スターラップのみで補強されている場合、ps は、

$$ps \equiv ps_{stirrup} = \frac{1}{2 \cdot b} \cdot \frac{A_v}{S_v} \quad (3)$$

トラス機構に基づき鉛直スターラップによって負担されるせん断力 Vst は、次式によって式(3)のせん断補強筋面積比と関係づけられる。

$$\begin{aligned} V_{st} &= A_v \cdot f_{vy} \cdot \frac{z}{S_v} \\ &= 2 \cdot b \cdot z \cdot f_{vy} \cdot ps_{stirrup} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、z：内力アーム長、fvy：降伏強度。

次に、軸方向補強筋による曲げ耐力とせん断

耐力の両者の増加を考慮するため、曲げ破壊時のせん断力 Vbu に対するせん断耐力 Vu の比を R で定義する。既往の研究<sup>1)</sup>によれば、鉛直スターラップのみによって補強された RC はりのせん断力比 Rs=Vus/Vbus と溶接金網のせん断力比 Rw=Vuw/Vbuw とは、はりのコンクリート断面寸法、主鉄筋量および ps が同一であれば実験的にほぼ等しい。すなわち、

$$\frac{V_{uw}}{V_{buw}} = \frac{V_{us}}{V_{bus}} \leq 1.0 \quad (5)$$

この仮定を採用することにより、溶接金網等を用いた場合のせん断耐力 Vuw は、次式で算定される。

$$V_{uw} = \frac{V_{us}}{V_{bus}} \cdot V_{buw} \quad (6)$$

ここに、Vus は、

$$V_{us} = V_{cu} + V_{st} \quad (7)$$

以上の計算手順をまとめると、

- 1) 溶接金網で補強したはりについて Vbuw を求める。併せて、式(2)より ps を計算する。
- 2) 式(4)の psstirrup に上記 1) で求めた ps を代入し、Vst を計算する。
- 3) 溶接金網と同じコンクリート断面寸法およ

び主鉄筋量のはりで、かつせん断補強筋の無い場合について、適切な算定式を用いてそのせん断耐力  $V_{cu}$  および曲げ破壊時のせん断力  $V_{bus}$  を求める。

4) 式(7)よりせん断力  $V_{us}$  を計算する。

5) 式(6)よりせん断耐力  $V_{uw}$  が計算される。

図-6にせん断耐力の実験値  $V_{uexp.}$  と提案式による計算値  $V_{ucal.}$  との比較を示す。ここに、 $V_{cu}$  および  $V_{bus}$  の計算には土木学会コンクリート標準示方書の規定式を用い、その際、部分安全係数は全て1.0とした。同規定式は、主に  $a/d > 3.0$  の実験データに基づいて導かれている。しかし、 $a/d < 3.0$  の場合に対しては安全側の評価を与えるため、本実験における  $a/d = 2.14$  および  $2.50$  の試験体に対してもそのまま使用した。せん断耐力比  $V_{ucal.}/V_{uexp.}$  は、平均値  $m = 0.880$ 、標準偏差  $\sigma = 0.107$  であり、安全側の評価となっている。一般的なせん断破壊試験に見られるばらつきを考えると、本算定方法は良好な適用性があるものと考えられる。なお、式(2)の  $p_s$  において縦筋と横筋の面積に重みを付ければ、さらに評価精度は向上すると考えられるが、今回は簡単のために考慮しなかった。

## 4. 2 他の算定方法との比較

### (1) 軸方向鉄筋を主鉄筋に変換する方法

石橋等<sup>2)</sup>は、鉛直スターラップをもたないRCはりの腹部に部材軸方向鉄筋を  $n$  段配置した場合のせん断耐力の算定方法として、部材軸方向の鉄筋断面積  $A_{si}$  をその有効高さ  $d_i$  とはり高さ  $h$  の比に応じて比例的に低減し、主鉄筋として取り扱う方法を提案している。

すなわち、

$$A_{seq} = \sum_{i=1}^n \frac{A_{si} \cdot d_i}{h} \quad (8)$$

を用いて等価な主鉄筋量を求め、これから計算される主鉄筋比  $p_w$  を用いてコンクリートの負担せん断力を求めようとする方法である。

図-7にせん断耐力の実験値と計算値との比較を示す。ここで、計算値  $V_{ucal.}$  に含まれる

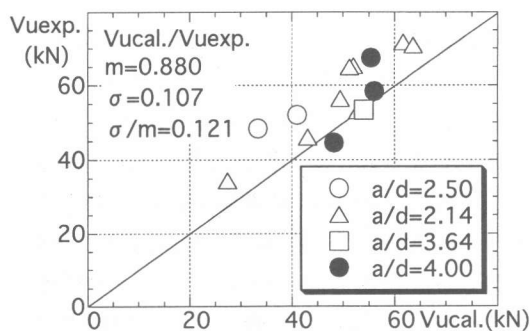


図-6 せん断耐力の実験値と計算値との比較 (今回の提案方法)

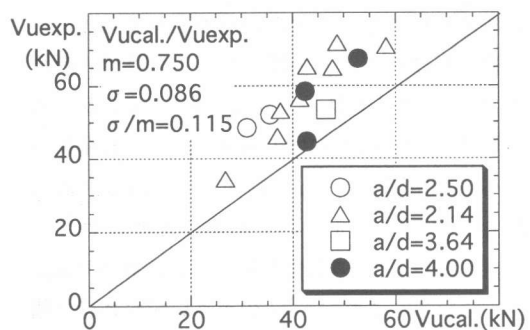


図-7 せん断耐力の実験値と計算値との比較 (軸方向鉄筋を主鉄筋に変換する方法)

$V_{cu}$  の評価に際しては、コンクリート標準示方書規定式中の主鉄筋比  $p_w$  の影響項  $\beta_p$  に式(8)より求めた値を代入した。同図中に示したように、せん断耐力比  $V_{ucal.}/V_{uexp.}$  は、平均値  $m = 0.750$ 、標準偏差  $\sigma = 0.086$  となった。

この方法を用いてもかなり良好なせん断耐力評価が得られるが、耐力をやや安全側に評価し過ぎている。また、はり腹部への部材軸方向鉄筋の配置による曲げ耐力の上昇の影響が考慮されていないこともさらに検討を要する。

### (2) 修正圧縮場理論による方法

著者等<sup>1)</sup>は、修正圧縮場理論<sup>3)</sup>において曲げモーメントおよび配筋の非対称性の影響を無視し、断面内での主応力分布は一樣であると仮定した解析でも、かなり良好なせん断耐力評価が可能であることを報告している。

図-8に今回の実験値と修正圧縮場理論による計算値との比較を示す。なお、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20~30%程度大きくなることを併せて指摘しており、ここでは図示していない。同図中に示したように、せん断耐力比  $V_{ucal.}/V_{uexp.}$  は、平均値  $m=0.985$ 、標準偏差  $\sigma = 0.125$  となり、今回追加した実験の結果を含めてもかなり良好なせん断耐力評価が得られることが分かる。ただし、□印および●印で表したせん断スパン比の大きな試験体の一部にせん断耐力が危険側に評価されるものがあり、曲げモーメントの作用を無視したことの影響が表れている。

図-9に修正圧縮場理論による計算せん断耐力  $V_u$  に占める骨材のかみ合い成分  $V_a$  の比とせん断補強筋面積比  $p_s$  との関係を示す。面積比  $p_s$  が小さい領域では  $V_u$  の約30%を  $V_a$  が占めており、かなりの大きさであることが注目される。しかし、 $p_s$  の増加に伴って  $V_a$  の負担率は減少している。これは、 $p_s$  の小さい試験体ほど横筋の降伏が早期に発生し、 $V_u$  がそれに伴うひび割れ幅の増大に支配されるためである。

## 5. 結論

本研究では、溶接金網をせん断補強筋として配置したRCはりを対象とし、その補強効果およびせん断耐力の評価方法について検討した。主実験変数としては、溶接金網の縦筋・横筋間隔、金網径およびせん断スパン比を採用した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 溶接金網は、鉛直スターラップと同等のせん断補強効果およびひび割れ分散性をもつ。
- (2) 溶接金網のせん断補強効果の評価方法を提案し、実験変数の変化に関わらず良好な適用性をもつことを検証した。
- (3) 溶接金網のせん断補強効果は、はり腹部の軸方向鉄筋を主鉄筋に換算する方法、および断面内での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もある程度評価が可能である。しかし前者は、せん断耐力をやや安全側に評価

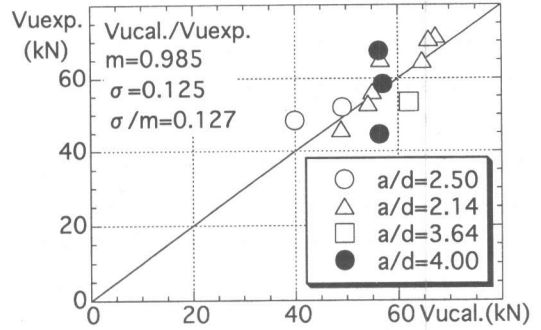


図-8 せん断耐力の実験値と計算値との比較  
(修正圧縮場理論による方法)

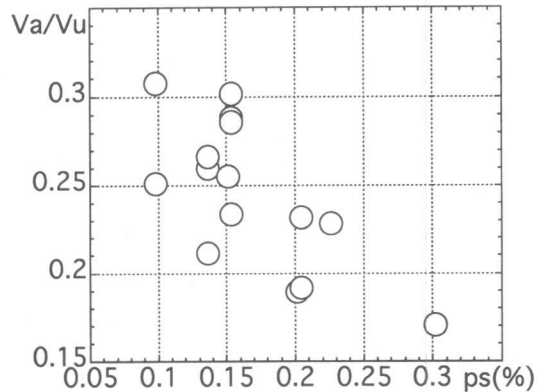


図-9 せん断耐力の計算値  $V_u$  に占める骨材のかみ合い成分  $V_a$  の比率  
(修正圧縮場理論による方法)

し過ぎる傾向にあり、後者は、せん断スパン比が大きくなるにつれて評価誤差が大きくなる傾向にあった。

## 参考文献

- 1) 長友克寛・角 徹三・春本 繁・松原三郎 : RCはり腹部に配置した軸方向鉄筋のせん断補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp.325-330, 1998
- 2) 石橋忠良・斉藤啓一・寺田年夫 : RCはりの腹部に配置された軸方向鉄筋のせん断破壊性状に及ぼす影響について, セメント技術年報, No.40, pp.495-497, 1986
- 3) Collins, M. P. et al. : A General Shear Design Method, ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 1, pp. 36-45, Jan./Feb. 1996