

# 論文 肋筋と斜め筋が鉄筋コンクリート有孔梁のせん断強度に及ぼす影響に関する FEM 解析

竇 祖融<sup>\*1</sup>・塩原 等<sup>\*2</sup>

要旨：本研究は、まず、試験体を解析対象とする非線形有限要素解析を行い、解析結果を実験結果と比較し、解析モデルの信頼性を確認した。次に、開口部が肋筋のみと斜め筋併用で補強される有孔梁について、孔径をパラメーターとし、配筋量とせん断強度の関係、補強限界などの検討結果により、肋筋と斜め筋がせん断強度に及ぼす影響を検討した。

キーワード：鉄筋コンクリート、有孔梁、せん断強度、非線形 FEM 解析

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の梁には設備配管のために開口が必要となることが多く、開口状況に応じて補強設計する必要がある。現在、有孔梁の終局せん断強度式としては、実験式のほかに、有孔梁の破壊メカニズム又は応力伝達モデルを仮定し、それらに塑性理論の上界定理或いは下界定理を用いて導いた理論式<sup>[1]</sup>が提案されているが、多くの仮定に基づいているので、破壊時のメカニズム、圧縮主応力の流れ、補強鉄筋の応力状態などをさらに検討する余地があると考えられる。

また、現場作業の省力化や簡素化のニーズに応じて種々の閉鎖型及び分離型開口補強金物が提案されているが、これらの金物の補強効果を適切に評価する力学モデル及び理論式が未だにないため、設計では、既往の実験式<sup>[2]</sup>が準用されることが多い。しかし、実験式では、金物の形状（構成鉄筋の配置位置、角度など）による補強効果の違いを必ずしも正しく評価していない。

一方、鉄筋コンクリート部材に関する有限要素解析は部材の剛性と終局強度を概ね捉えるようになってきた。本研究は非線形有限要素解析汎用ソフト DIANA8.1<sup>[3]</sup>を用いて、肋筋と斜め筋の補強効果を検討する。

## 2. 解析方法

### 2.1 解析条件

本研究では、有孔梁の解析を 2 次元平面応力と仮定し、変位制御の一方向増分解析で行い、収束計算はニュートンラプソン法によった。

### 2.2 構成則

#### (1) コンクリート

圧縮応力を受けるコンクリートの応力歪関係には、図 - 1a に示すように圧縮強度までは式(1)の Saenz 式<sup>[4]</sup>を用い、圧縮軟化域は、直線で近似した。終局歪度  $\epsilon_m$  は圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  を考慮し、式(2)の山谷ら<sup>[5]</sup>の提案式により算出した。

引張応力を受けるコンクリートの応力歪関係を図 - 1b に示す。引張強度（式(3)より算出）に達するまでの応力歪関係を直線とし、その勾配は圧縮側の応力歪曲線の初期弾性係数  $E_0$  と同一とした。ひび割れ発生後の引張応力とひび割れ幅の関係は、図 - 2 に示す「コンクリート標準示方書」の 1/4 モデル<sup>[6]</sup>を用いた。更に、要素の等価長さ  $L_{eq}$  を用いてひび割れ幅  $w$  を歪に変換し、引張破壊エネルギー  $G_{ft}$  が各要素の寸法に依存しない応力歪関係（図 - 1b）を用いた。

圧縮と引張の応力歪関係の共通な特徴は、要素寸法依存性を軽減するため、軟化領域を破壊

\*1 東京大学大学院 大学院生

工修 (正会員)

\*2 東京大学大学院 助教授

工博 (正会員)

エネルギーと要素等価長さによって定義したこと及び、除荷経路を原点指向型としたことである。ここで、破壊エネルギー  $G_{fc}$ 、 $G_{ft}$  は文献[5]の引用された式に基づき、要素等価長さ  $L_{eq}$  は  $\sqrt{2A}$  ( $A$  は要素の面積である) とした。

また、コンクリートのひび割れは分散ひび割れモデルの回転ひび割れモデルで表現する。

$$\sigma = \frac{\varepsilon_i \cdot E_0}{1 + (E_0 / E_s - 2) \cdot \varepsilon_i / \varepsilon_s + (\varepsilon_i / \varepsilon_s)^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_m = \frac{G_{fc}}{f_c L_{eq}} + \frac{\varepsilon_s}{2} \quad (2)$$

$$f_t = 0.58(f_c)^{2/3} \quad (3)$$

上式に、 $\varepsilon_i$  は圧縮歪みで、 $E_0$  は初期ヤング係数、 $E_s$  は圧縮強度に達した時の応力度と歪み度の比、 $\varepsilon_s$  は圧縮強度時の歪み、 $G_{fc}$  は破壊エネルギー、 $L_{eq}$  は要素等価長さ、 $f_c$  はコンクリートの圧縮強度である。

### (2) 鉄筋

鉄筋の応力歪関係は Bi-linear 型モデルを用いて、降伏点後の 2 次剛性をヤング係数の 1/100 とした。塑性化の判定基準は Von Mises の降伏条件によった。

### (3) 付着応力 - 滑り

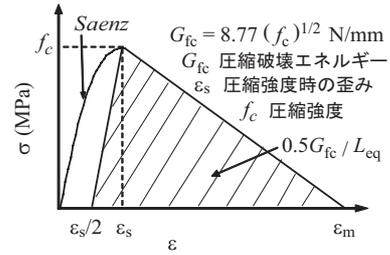
付着応力 - 滑りの挙動は森田らの研究結果<sup>[7]</sup>を参照し、勾配が  $200 \text{ N/mm}^3$  の一直線で表した。

## 3.有限要素解析モデルの検証

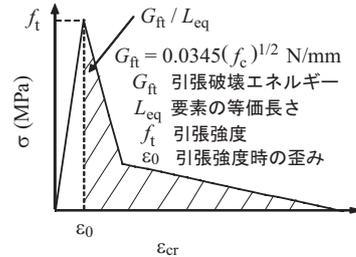
解析モデルの信頼性を検証するため、既往の試験体を解析対象とし有限要素解析を行った。

### 3.1 試験体概要

三橋ら<sup>[8]</sup>の試験体 (No.1, No.2, No.3) を解析対象とした。No.1 は無開口の梁で、No.2 は無補強 (肋筋のみ) の有孔梁で、No.3 は補強金物を用いた有孔梁である。共通因子として、せん断スパン比は 1.5 で、孔径比は 1/3 である。また、コンクリート強度と補強筋の配筋量は表 - 1 に示す。また、肋筋 D10 と金物 S6 の降伏強度は  $360 \text{ N/mm}^2$  と  $917 \text{ N/mm}^2$  である。



(a) 圧縮側



(b) 引張側

図 - 1 コンクリートの応力 - ひずみ関係

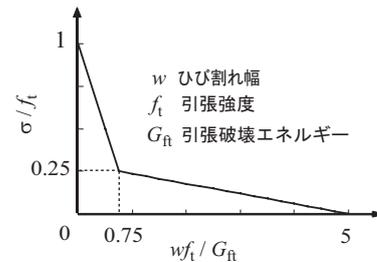
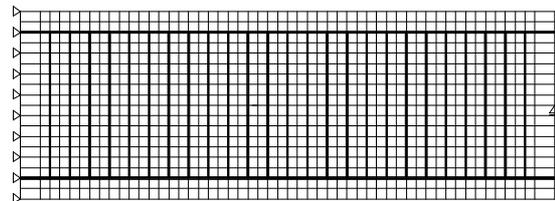
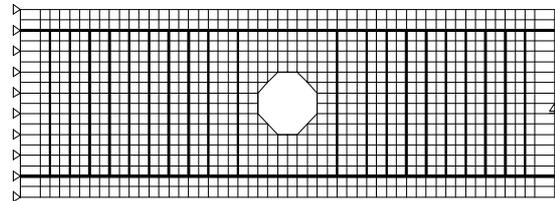


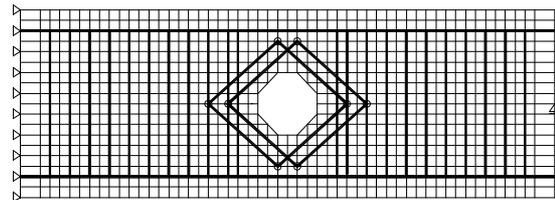
図 - 2 1/4 モデル



試験体 No.1



試験体 No.2



試験体 No.3

図 - 3 試験体の要素分割

表 - 1 試験体一覧

試験体	コンクリート強度 (MPa)	開口部	
		一般部 あばら筋 $P_w(\%)$	金物 あばら筋 $P_d(\%)$
No.1	32.7	2-D10@50 0.95	-
No.2	30.7	2-D10@50 0.95	2-D10 0.28%
No.3	30.7	2-D10@50 0.95	4-D10 0.56%

表 - 2 解析定数一覧

試験体	$f_t$ (MPa)	$\epsilon_0$ ( $\mu$ )	$L_{eq}$ (mm)	$G_{ft}$ N/mm	$G_{fc}$ N/mm
No.1	2.74	2000	35.4	0.197	50.2
No.2	2.62	2000	35.4	0.191	48.6
No.3	2.62	2000	35.4	0.191	48.6

### 3.2 有限要素モデル

要素分割を図 - 3 に示す。コンクリートに 4 節点四辺形アイソパラメトリック平面応力要素，鉄筋に 2 節点のトラス要素を用いる。主筋を表現するトラス要素の分割はコンクリートの要素分割に合わせるが，せん断補強筋の両端は主筋の節点と共有させる。金物の曲折部とコンクリートとの相対変位を考慮せず，その節点を共有させて完全定着とする。また，主筋とコンクリート間にインターフェース要素を配置して付着 - 滑り特性を表現する。境界条件は，モデル左側断面の各節点をピン，右側断面の中心節点にローラーを設置した。左側断面の各節点に鉛直方向の変位増分を与えて，右側断面では各節点が中心節点の水平方向変位と一致するように設定した。前述の計算式により算出された解析用定数を表 - 2 に示す。

### 3.3 解析結果

#### (1) 最大荷重及び荷重 - 変位関係

表 - 3 に実験値と解析値の最大荷重の比較を示す。No.1 は実験値よりやや小さいが，No.2，No.3 は実験より多少大きい。いずれも実験値の  $\pm 10\%$  範囲内である。

荷重 - 変形の関係において，供試体 No.2 と No.3 の解析結果及び実験結果を併せて図 - 4 に示す。供試体 No.2 はひび割れ発生後剛性が実験値よりやや低い，最大荷重まで実験値とほぼ

表 - 3 最大荷重の比較 (kN)

試験体	実験値	解析値	実験 / 解析
No.1	605	588	0.97
No.2	253	233	1.08
No.3	366	363	1.01

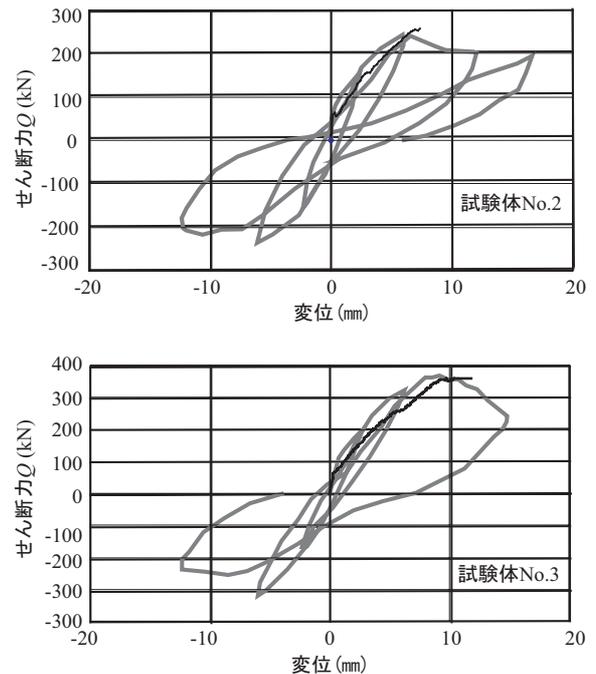
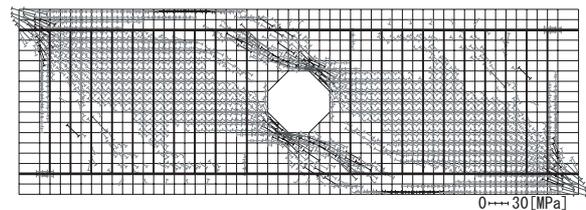
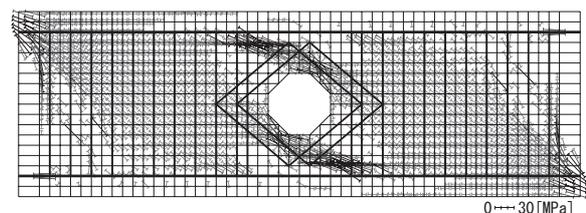


図 - 4 荷重 - 変形関係



(a) 試験体 No. 2



(b) 試験体 No. 3

図 - 5 圧縮主応力分布

一致している。供試体 No.3 はひび割れ発生後の剛性低下が供試体 No.2 と同等程度であり、実験値より比較的の低くて、最大荷重時の変位は実験値を大幅に超えている。金物の配置による剛性増加は実験結果のように再現できなかった。

### (2) 圧縮主応力分布

試験体の最大荷重時の圧縮主応力分布及びストラットの応力を図 - 5 に示す。共通点として、同図に示すように、開口の上下に孔を避けて通る斜めの圧縮ストラットが形成され、ストラット間に零応力箇所が存在している。No.3 は No.2 に比べて、高圧縮応力部分が広がっていて、ストラット間の零応力部分が小さくなった。金物のせん断補強効果であると考えられる。

### (3) 引張主歪分布

引張主歪分布を図 - 6 に示す。2 試験体とも最大荷重の約 60%程度で孔の対角方向に引張主ひずみが見られた。最大荷重の時に No.2 は対角方向に引張主ひずみが顕著になったが、No.3 は孔上下に孔の接線方向に大きな引張主ひずみが生じた。実験から観察されたひび割れ発生状況と類似している。

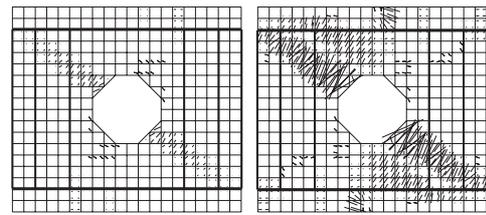
## 4. 肋筋と斜め筋の補強効果

前述の有限要素モデルと材料構成則を用いて、孔径比をパラメータとして図 - 7 に示すように 4 つのモデルで解析を行い、肋筋と斜め筋のせん断終局強度に対する補強効果を検討する。開口部でせん断破壊先行させるため、主筋の配筋率を 5%とし、応力と歪の関係弾性とした。

### 4.1 せん断強度に対する補強効果

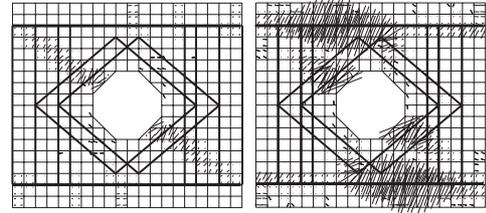
肋筋のみを有する有孔梁において、違う孔径に対して  $p_w \sigma_{wy}$  と終局強度の関係、肋筋の補強限界を求めた。

肋筋量とせん断強度との関係を図 - 8 に示す。同図からせん断強度が  $p_w \sigma_{wy}$  の増加に伴って増えるが、補強限界  $[p_w \sigma_{wy}]_L$  を超えると頭打ちになること及び、耐力限界が孔径比に逆比例することが分かる。また、補強限界と孔径の関係は



0 → 50000 [μ]

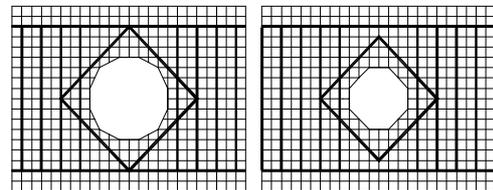
(a) 試験体 No. 2



0 → 50000 [μ]

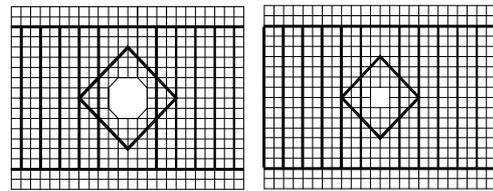
(b) 試験体 No. 3

図 - 6 引張主歪分布



$H/D = 4/9 (0.44)$

$H/D = 3/9 (0.33)$



$H/D = 2/9 (0.22)$

$H/D = 1/9 (0.11)$

図 - 7 違う孔径の開口部の要素分割 (例)

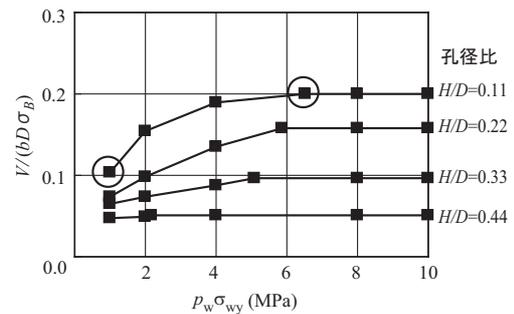


図 - 8 肋筋  $p_w \sigma_{wy}$  とせん断強度の関係

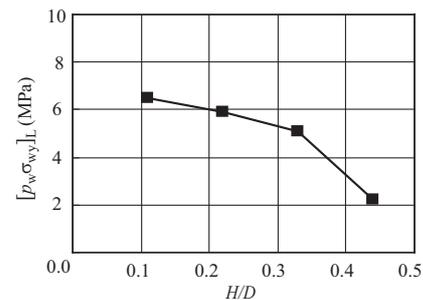


図 - 9 孔径と  $[p_w \sigma_{wy}]_L$  の関係

図 - 9 に示すように、孔径が大きいほど補強限界が小さくなる。

#### 4.2 斜め筋の補強効果

上の検討によって、大開口の有孔梁に対して筋だけの補強による耐力回復はごく限られるので、以下、 $H/D$  が 0.33 で筋配置量  $p_w \sigma_{wy}$  が補強限界である場合に斜め筋の角度及び配置位置、配置量などが補強効果に及ぼす影響を検討する。本研究では閉鎖型金物だけを議論し、金物を構成する鉄筋を斜め筋と称する。

##### (1) 斜め筋の角度と配置位置

$H/D$  が 0.33 で筋の  $p_w \sigma_{wy}$  が補強限界である条件で、斜め筋と材軸となす角度が  $45^\circ$  の試験体 A、 $30^\circ$  の試験体 B 及び試験体 A より大きい金物を孔際に配置した試験体 C のせん断強度を比較した。図 - 10 に示すように同じの  $p_d \sigma_{dy}$  ( $p_d = A_d / b_{jt}$ ) に対するせん断強度増加量に関しては金物 B の方が早く頭打ちになり限界値も小さい、一方、サイズの大きい金物 C のせん断補強効果が顕著である。

##### (2) 筋筋の $p_w \sigma_{wy}$

$H/D$  が 0.33 で  $p_w \sigma_{wy}$  が 1.0, 5.1 (図 - 8 にて囲んだ) の試験体に  $45^\circ$  の菱形金物を配置し、斜め筋の  $p_d \sigma_{dy}$  とせん断強度増加量の関係を図 - 11(a) に示す。同図のように、筋筋が補強限界である場合のせん断強度増加量は比較的低いレベルで頭打ちになるが、図 - 8 を参照して筋筋と斜め筋を併用する場合に筋筋が多い方のせん断強度の限界値が高い。

##### (3) 孔径

孔径比が 0.33, 0.44 で、筋筋が補強限界の試験体に同じ大きさの  $45^\circ$  菱形金物を用いて、斜め筋の  $p_d \sigma_{dy}$  とせん断強度増加量の関係を図 - 11(b) に示した。孔径比 0.33 の試験体は、孔径比 0.44 の試験体に比べてせん断強度増加量の限界値が高い。

#### 5. 終局時の応力分布の検討

前章に述べた試験体 A ~ C では、3 体とも金物の降伏が、孔際のコングリートの圧縮軟化により耐力が下がる。最大荷重時の圧縮主応力分布

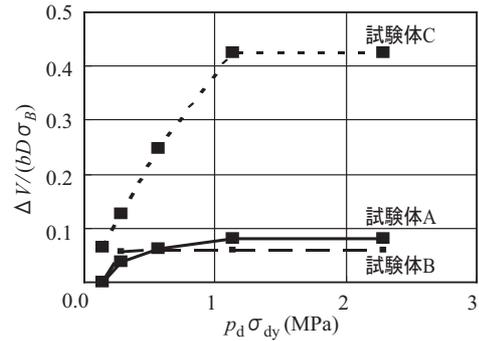
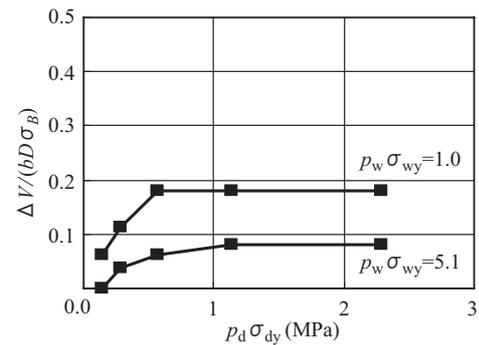
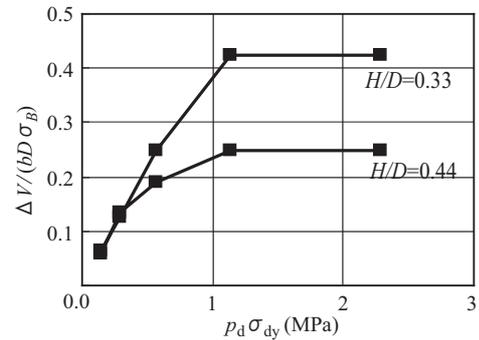


図 - 10 斜め筋の角度と配置位置の影響



(a) 筋筋  $p_w \sigma_{wy}$  の影響



(b) 孔径の影響

図 - 11  $p_d \sigma_{dy}$  とせん断強度増加量の関係

図 (図 - 12) を比較すると、試験体 A, B では孔上下のストラットが狭くて、ストラットの平均応力度が 20MPa ほどに留まっていたが、試験体 C のストラットでは広がりながら平均応力度が 30MPa 程度となった。金物が大きいほど、最大荷重時に孔上下のストラットの幅が広くて応力度も高いことが分かった。トラス機構でストラットと筋筋の応力釣り合いから考えると、最大荷重時の筋筋の応力度は金物が大きくなるにつれて高くなるから、試験体のせん断強度も高いことが分かる。

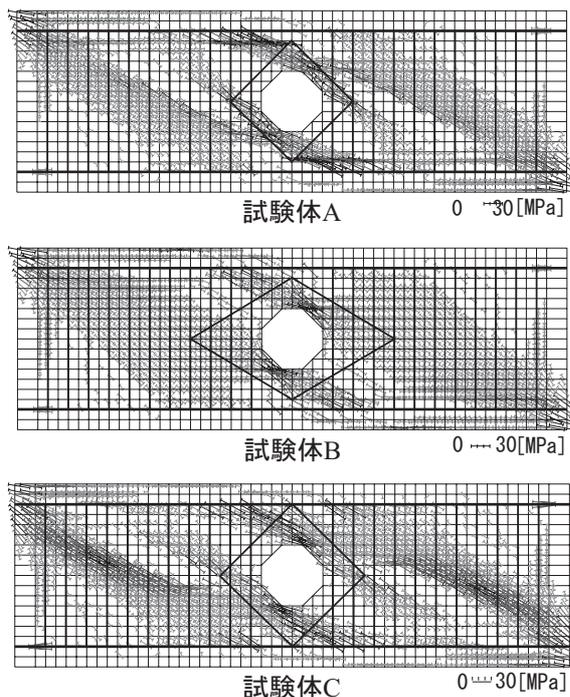


図 - 12 最大荷重時の圧縮主応力分布図

## 6. まとめ

本文は有孔梁を有限要素モデルにし、適切な材料非線形特性を用いて解析を行った。解析モデルの信頼性を実験より確認した上で、肋筋と斜め筋が有孔梁の終局強度に及ぼす影響を検討した。今回の解析対象とした有孔梁の範囲では、次のことが明らかとなった。

- (1) 本研究に用いられる材料の構成則とモデルによる解析は検証対象とした有孔梁のせん断強度、剛性と比較的良好に対応している。
- (2) 肋筋のみで補強される有孔梁には頭打ちの補強限界が存在する。孔径が大きい場合のせん断強度の限界値が低いので、肋筋のみの補強効果はあまり期待できない。
- (3) 斜め筋のせん断効果に関して、解析結果から、斜め筋が軸材と成す角度が大きいほど、金物が大きいほど、肋筋の  $p_w$   $w_y$  が小さいほ

ど、斜め筋によるせん断強度増加量が顕著であることが示された。金物の斜め鉄筋の角度、配置位置の違いにより、試験体のせん断強度に大きな影響を与えられられる。

## 参考文献

- 1) 市之瀬敏勝, 横尾慎一: 鉄筋コンクリート有孔梁のせん断設計法, コンクリート工学年次論文報告集, 1991.2, pp.303 - 308
- 2) 広沢雅也, 清水泰: 「鉄筋コンクリート造有孔ばりのせん断強度とじん性(その1 有孔ばりについての既往の研究成果)」, 建築技術, 1979.3, pp.13 - 21
- 3) DIANA Finite Element Analysis Users Manual, TNO Building and Construction Research, 2002
- 4) Saenz, L.P.: Discussion of 'Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete', by Desayi and Krishnan, ACI, Vol.61, No.9, p1229-1235, 1964
- 5) 山谷敦, 中村光, 檜貝勇: 回転ひび割れモデルによる RC 梁のせん断挙動解析, 土木学会論文集, No.620/V-43, p187-199, 1999.5
- 6) (社)土木学会: コンクリート標準示方書,
- 7) 森田司郎, 角徹三: 繰返し荷重における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, p15-24, 1975年3月
- 8) 三橋博己ら: 鉄筋コンクリート造有孔梁に関する実験的研究 - 開孔補強について -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p929-930, 1999.9