

# 論文 軸力・曲げモーメント・せん断力を受ける鉄筋コンクリート せん断面の強度に関する研究

上原 修一<sup>\*1</sup>・江崎文也<sup>\*2</sup>

**要旨:**軸力・曲げモーメント・せん断力の複合応力が加わる鉄筋コンクリートせん断面の実験について報告する。次に、すでに提案した、極限解析に基づく鉄筋コンクリートせん断面の強度評価式に用いるコンクリート圧縮強度有効係数の評価方法を提案する。さらに、ここで報告する鉄筋コンクリートせん断面試験体の強度は、提案する方法により、適切に評価できることを示す。

**キーワード:**有効係数, せん断面, 極限解析, 剛体ばねモデル, 降伏条件

## 1. 序

一般に多く見られる複雑な壁配置を有する、中・低層鉄筋コンクリート（以下、RCとする）建築物の破壊機構を、剛体ばねモデル法により、簡便に解析する方法を開発するため、軸力・曲げモーメント・せん断力（以下、 $N \cdot M \cdot Q$ とする）を受けるRCせん断面の力学挙動について研究を進めている。

本論文では、無筋コンクリートせん断面試験体の強度について示した前報[1]に続き、RCせん断面試験体の実験結果について報告するとともに、その強度評価に用いるコンクリート圧縮強度有効係数の評価法について論ずる。

## 2. 実験概要

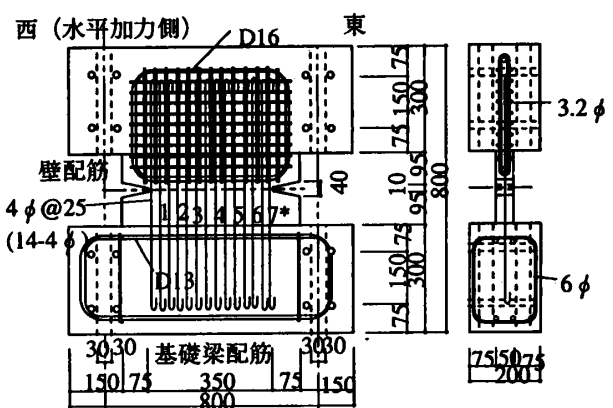
### 2.1 試験体

表-1に試験体一覧を示す。図-1に示すように、壁板中央のノッチを施したせん断面（せい  $h=35\text{cm}$ , 厚さ  $t=5\text{cm}$ ）を横切る鉄筋は、せん断面に直交させた。試験体は、図-1に示す壁鉄筋比  $p_s$  が多いもの（ $p_s=1.01\%$ ）3体、少ないもの（ $p_s=0.50\%$ ）3体の計6体であり、それらに対しそれぞれ載荷条件を変えた。ここで、 $e$ :荷重点の断面中心からの偏心距離である。鉄筋は、 $4\phi$ （降伏点  $\sigma_y=285\text{MPa}$ ）で、シングル配筋と

し、壁長さ方向に均等に配した。

### 2.2 加力方法、測定方法

加力装置を図-2に示す。軸力を所定の偏心位置に載荷することにより、断面に軸力と曲げモーメントを作用させ、さらに頂部のはりに水平力を漸増単調載荷することにより、せん断力を加えた。変位の測定方法は、文献[2]に示す方法と同じである。ただし、鉄筋のひずみについては、図-1に示す位置（1本おき）の鉄筋のせん断面位置に、1対のひずみゲージを表裏に貼付し、そのひずみの平均値を計測した。



\*ひずみゲージを貼付した鉄筋の番号（ただし、RC00010Hのみ左端より貼付している）

図-1 試験体形状および配筋図  
(RC00010H, RC09010H, RC05010H)

\*1 有明工業高等専門学校助教授 建築学科、工修（正会員）

\*2 九州共立大学工学部教授 建築学科、工博（正会員）

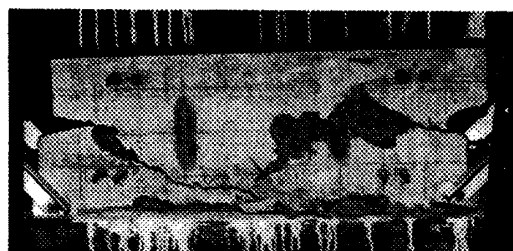
表-1 試験体一覧

| 試験体名     | $\psi$ | 載荷 条件 |              |
|----------|--------|-------|--------------|
|          |        | n     | m (e (cm))   |
| RC00010H | 0.149  | 0.1   | 0 (0)        |
| RC09010H | 0.149  | 0.1   | 0.090 (31.5) |
| RC05010H | 0.136  | 0.1   | 0.050 (17.5) |
| RC05010L | 0.068  | 0.1   | 0.050 (17.5) |
| RC00010L | 0.059  | 0.1   | 0.0 (0.0)    |
| RC07010L | 0.059  | 0.1   | 0.070 (24.5) |

表-2 コンクリートの力学的性質

| 試験体名     | $\sigma_B$ (MPa) | $E_c$ (GPa) |
|----------|------------------|-------------|
| RC00010H | 19.3             | 23.4        |
| RC09010H |                  |             |
| RC05010H | 21.2             | 23.3        |
| RC05010L |                  |             |
| RC00010L | 24.1             | 23.8        |
| RC07010L |                  |             |

鉄筋比大



(a) RC00010H 南面



(b) RC00010L 南面

図-3 各試験体の破壊状況

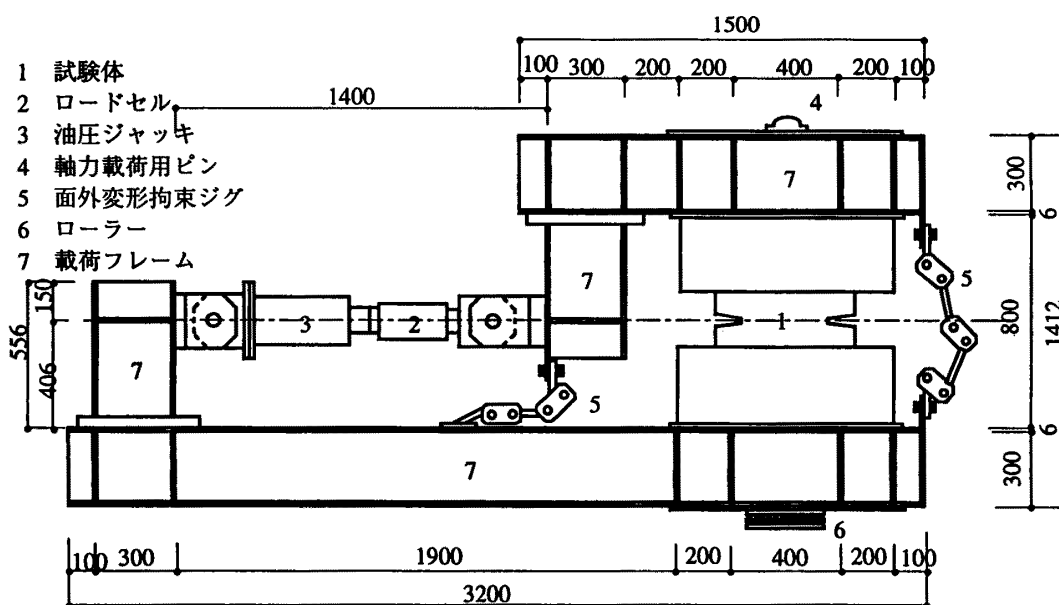


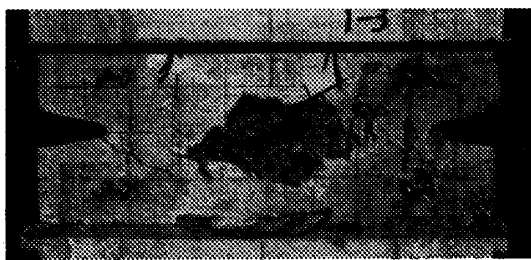
図-2 せん断面にN・M・Qを加える実験の加力装置

### 3. 実験結果

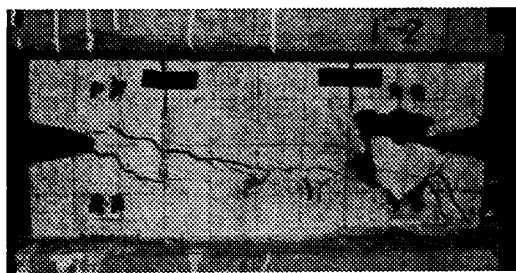
図-3に、各試験体の破壊状況を示す。

図-3では2段3列に破壊写真を示しているが、右の試験体ほど曲げモーメントが大きく、上の試験体がより壁鉄筋比が大きい。これらの写真から、曲げモーメントが大きいと、せん断ひび割れが少なくなり、ひび割れ角度の勾配がゆるくなっていることがわかる。また、鉄筋比が大きいほど激しく破壊している。

これらの試験体のなかで、ノッチから離れたところまで破壊部が広がるものがあるが、これは、面外のずれ破壊（壁板の面内の力学として考えた場合、圧壊とみなされる）であり、壁の小口面ではノッチを中心に斜めの破壊面をなすものである。したがって、巨視的にはノッチ面での破壊であるとみなした。また、このように、破壊は2次元にとどまらず、3次元的な広がりを持つが、壁板の面内の現象としてとらえた場合、巨視的には健全な固体部分が破壊部を介して力



(c) RC05010H 南面



(e) RC09010H 南面



(d) RC05010L 南面



(f) RC07010L 南面

→ 曲げモーメント大

図-3 各試験体の破壊状況 (続き)

の伝達をなしているとみなされる。したがって、本研究では、図-4に示すように、骨組の塑性ヒンジの扱いと同様に、破壊部をある破壊断面に集約し、評価することとしている。

詳細な破壊状況、計測データは文献[3]を参照されたい。

コンクリートの  $\sigma_c$ : コンクリート圧縮強度,  
 $E_c$ : コンクリートヤング係数を表-2に示す。

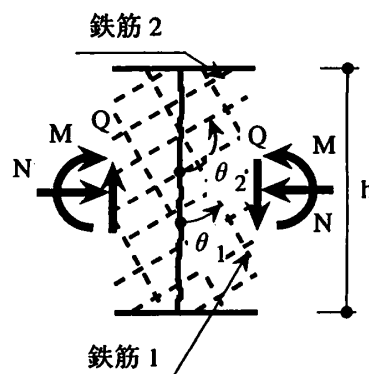
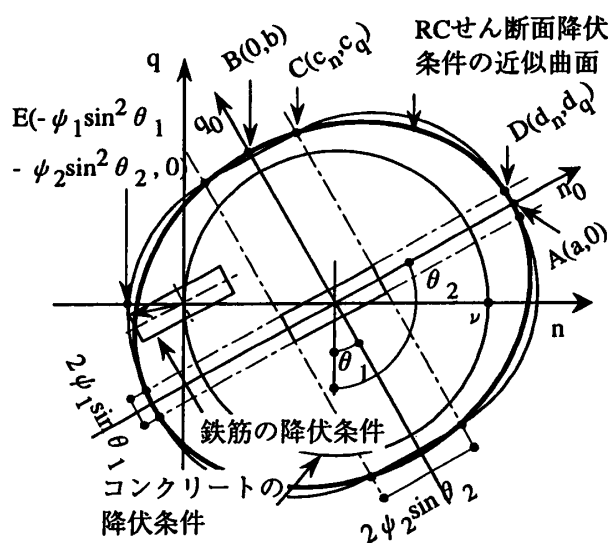
#### 4. RCせん断面の有効係数評価法

##### 4.1 RCせん断面の強度評価式

図-4のようなRCせん断面が、 $N \cdot M \cdot Q$ を受ける時の強度を、図-5に示すように、コンクリートの降伏条件と鉄筋の降伏条件を累加して求めた。この時、 $n$ - $q$ 平面においてはコンクリートと鉄筋の降伏条件の継ぎ目を通り、 $m$ 軸に関してはコンクリートと鉄筋の降伏条件の和の頂点を通るように、コンクリートの降伏曲面を拡大した曲面を、RCせん断面の降伏曲面とした[4]。その関数を式(1)に示す。

$$\frac{1}{2\nu} \left\{ \left( \frac{n_0}{\alpha_n} \right)^2 + \left( \frac{q_0}{\alpha_q} \right)^2 - \frac{\nu^2}{4} \right\} + \frac{m_0}{\alpha_m} = 0 \quad (1)$$

式(1)は、無筋コンクリートせん断面の降伏条

図-4  $N \cdot M \cdot Q$ を受けるRCせん断面図-5  $n$ - $q$ 平面におけるRCせん断面降伏条件と各座標

件から導かれたものである。  $\alpha_n, \alpha_q, \alpha_m$  は、鉄筋による拡大係数であり、無筋コンクリートせん断面の場合はすべて1となる。また、式(1)は降伏曲面の中心を通る  $n_0$ - $q_0$ - $m_0$  座標で示したものである。したがって、図-5に示すように、座標系  $n$ - $q$ - $m$  との関係は、式(2)となる。

$$\begin{Bmatrix} n_0 \\ q_0 \\ m_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n - \frac{\nu}{2} \\ q \\ m \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、

$$n = \frac{N}{th\sigma_B}, \quad q = \frac{Q}{th\sigma_B}, \quad m = \frac{M}{th^2\sigma_B} \quad (3)$$

$$\alpha_n = \frac{a}{\frac{\nu}{2}}, \quad \alpha_q = \frac{b}{\frac{\nu}{2}},$$

$$\alpha_m = \frac{\frac{\nu}{8} + \frac{1}{4}\psi_1\sin^2\theta_1 + \frac{1}{4}\psi_2\sin^2\theta_2}{\frac{\nu}{8}} \quad (4)$$

$\nu$ : コンクリートの有効係数,  $\psi_1$ : 鉄筋1の力学的鉄筋比,  $\theta_1$ : 鉄筋1の角度,  $\psi_2$ : 鉄筋2の力学的鉄筋比,  $\theta_2$ : 鉄筋2の角度 ( $=\theta_1 + \pi/2$  と設定している) である。さらに、 $a, b$  は図-5に示す点A、点Bの座標値であり、次式で示される。

$$a = \sqrt{\frac{c_n^2 d_q^2 - d_n^2 c_q^2}{d_q^2 - c_q^2}}, \quad b = \sqrt{\frac{d_n^2 c_q^2 - c_n^2 d_q^2}{d_n^2 - c_n^2}} \quad (5)$$

$$c_n = \psi_2 \sin\theta_2, \quad c_q = \psi_1 \sin\theta_1 + \frac{\nu}{2},$$

$$d_n = \psi_2 \sin\theta_2 + \frac{\nu}{2}, \quad d_q = \psi_1 \sin\theta_1 \quad (6)$$

ここで  $c_n, c_q, d_n, d_q$  は図-5に示す点C、点Dの座標値である。

RCせん断面の降伏曲面の例は文献[4]を参照。

#### 4.2 無筋コンクリートせん断面の有効係数評価法

無筋コンクリートせん断面の有効係数評価法については、すでに文献[1]で示した。そこでは、有効係数に及ぼす要因として、コンクリート強度のほか、垂直応力度、垂直ひずみ勾配、扁平率を取り上げた。つまり、コンクリート強度、垂直応力度、扁平率の影響を考慮した有効係数  $\nu$  は、式(7)～式(9)で計算できる。

$$\nu_n = 2.5(0.9 - \nu_0) \frac{\sigma_u}{\sigma_B} + \nu_0 \quad \left( \frac{\sigma_u}{\sigma_B} \leq 0.4 \right) \quad (7)$$

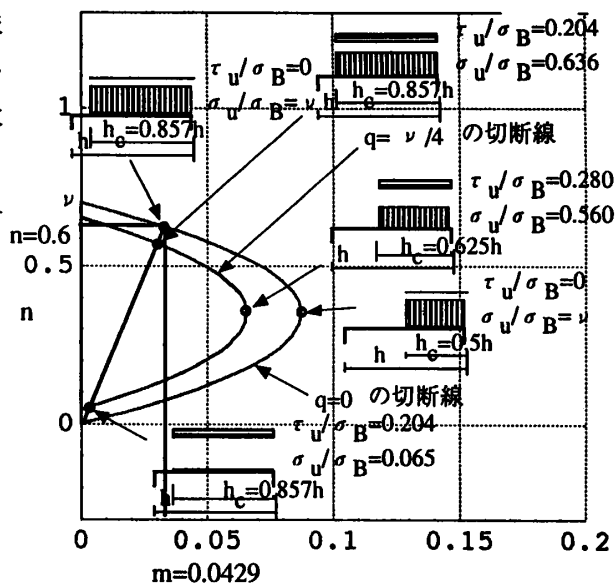


図-6  $m, n, q$  を受ける無筋コンクリートせん断面の応力度分布 ( $\nu = 0.7$ )

$$\nu_n = 0.9 \quad \left( \frac{\sigma_u}{\sigma_B} \geq 0.4 \right) \quad (8)$$

$$\nu_0 = \alpha_f(0.8 - \sigma_B/235) \quad (\sigma_B: \text{MPa}) \quad (9)$$

ここで、垂直応力度比  $\sigma_u/\sigma_B$  などは次式で、求められる。

$$\frac{h_c}{h} = 1 - \frac{2m}{n}, \quad \frac{\sigma_u}{\sigma_B} = \frac{n^2}{n-2m}, \quad \frac{\tau_u}{\sigma_B} = \frac{nq}{n-2m} \quad (10)$$

なお、 $h_c$ : 圧縮されるせん断面の長さである。このせん断面に加わる力  $nmq$  と応力度等の関係を図-6に示す。

$\alpha_f$  は、扁平率に係わる係数と考え、本実験シリーズでは  $\alpha_f = 0.5$  とした。この係数については、別の機会に検討する予定である。

さらに、垂直ひずみ勾配の影響を考慮した有効係数  $\nu_{cal}$  は、次式で算定した。

$$\nu_{cal} = \alpha_e \nu_n \quad (11)$$

$$\alpha_e = 1.0 + 1.57 \frac{m}{n} \quad (12)$$

#### 4.3 RCせん断面の有効係数評価法

RCせん断面を構成する、鉄筋とコンクリートのそれぞれの応力を、RCせん断面降伏条件から、導くのは容易ではない。

そこで、ここでは次のような近似的な方法で、コンクリートの応力状態を推定し、有効係数を定める。なお、ここでは鉄筋はせん断面に直交しているものとする。

図-7はコンクリートの垂直応力度比  $\sigma_u / \sigma_B$  が0.4以下となる範囲（コンクリートの受ける  $m$  と  $n$  の組み合わせ）を示している。この範囲は、コンクリート圧縮部分の受ける垂直応力度比の平均値が0.4以下であることから、コンクリート圧縮部分の鉄筋も平均的には引張降伏していると考えて良いと思われる。従って、この範囲では、全鉄筋が引張り降伏していると考え、コンクリートの垂直応力度比は、式(10)の中の  $n$  のかわりに  $n + \psi$  を代入して、式(13)のようになる。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_B} = \frac{(n + \psi)^2}{(n + \psi) - 2m} \quad (13)$$

ここで、 $\psi$ ：せん断面に直交する鉄筋の力学的鉄筋比である。

一方、文献[5]における、曲げモーメントが加わらないせん断面の検討で、鉄筋量の有効係数に対する影響は少ないという性状が認められた。式(13)には、鉄筋による垂直応力が含まれていることから、これを除く必要がある。その時、コンクリート圧縮部分の鉄筋が、曲げモーメントが加わらないせん断面と同じ状態にあると考えられることから、この部分の鉄筋の影響のみ除くこととした。

軸力  $n$  とせん断力を負担しない部分の鉄筋によって生じる垂直応力度比は次式で計算される。

$$\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_B}\right)_{n+\psi_t} = \frac{\sigma_u}{\sigma_B} - \psi \frac{h_c}{h} \quad (14)$$

式(14)に、式(10)と式(13)の関係式を代入して（この時  $n$  のかわりに  $n + \psi$  を代入）、

$$\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_B}\right)_{n+\psi_t} = \frac{(n + \psi)^2}{n + \psi - 2m} - \psi \frac{n + \psi - 2m}{n + \psi} \quad (15)$$

を得る。RCせん断面では、式(10)の  $\sigma_u / \sigma_B$  のかわりにこの式(15)を用いることになる。

次に、 $m/n$  の影響の評価方法を考える。図-8は  $q=0$  の時の、コンクリート、鉄筋の降伏条件と、それらを加えたRC降伏条件を示す。図に示すように、RCせん断面の応力  $m$ 、 $n$  から、コンクリートに加わる  $m$  と  $n$  の比を近似的に算出する（ $q \neq 0$  の時も同様に近似できる）。つまり、次の

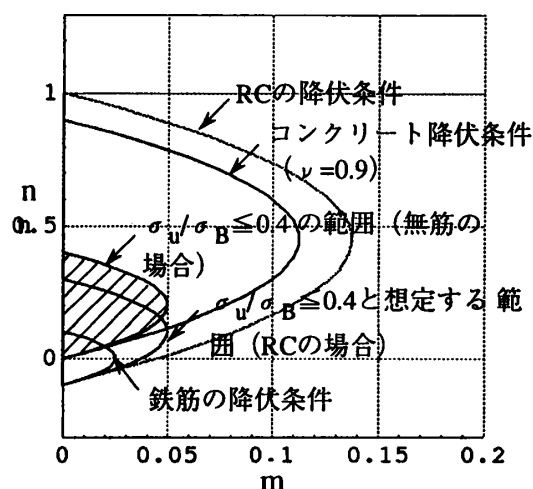


図-7 RCせん断面においてコンクリートの垂直応力度比  $\sigma_u / \sigma_B \leq 0.4$  と想定する範囲

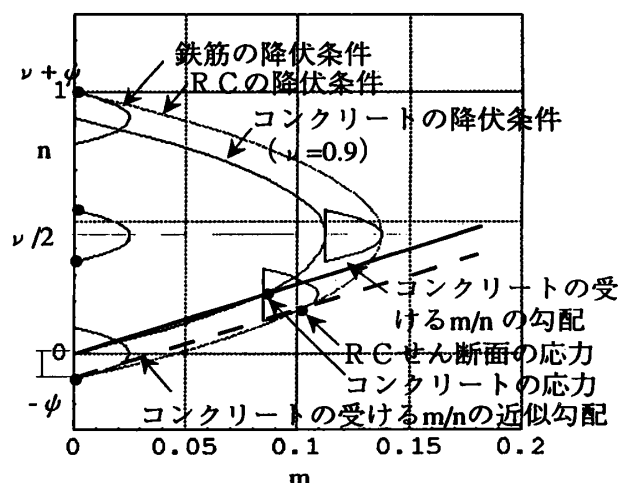


図-8 コンクリートに生ずる  $m/n$  の評価の近似

ように評価法を定める。

$$\alpha_e = 1.0 + 1.57 \frac{m}{n + \psi} \quad (16)$$

これらの式から得られる  $\alpha_e$  の値を使って式(11)により有効係数計算値  $\nu_{cal}$  を計算する。

鉄筋がせん断面に対し斜交する場合は、図-5の点Eの座標値より、式(13)～式(16)において、 $\psi$  のかわりに  $\psi_1 \sin^2 \theta_1 + \psi_2 \sin^2 \theta_2$  と置き換えて、算定してよいと思われる。

## 5. RCせん断面強度の評価

図-9に、提案した方法により求めた有効係数による計算強度と実験値の比較を示す。黒丸が実験値、太い実線が解析値（降伏曲面の裁断面）である（背面の陰は降伏曲面のシルエットであ

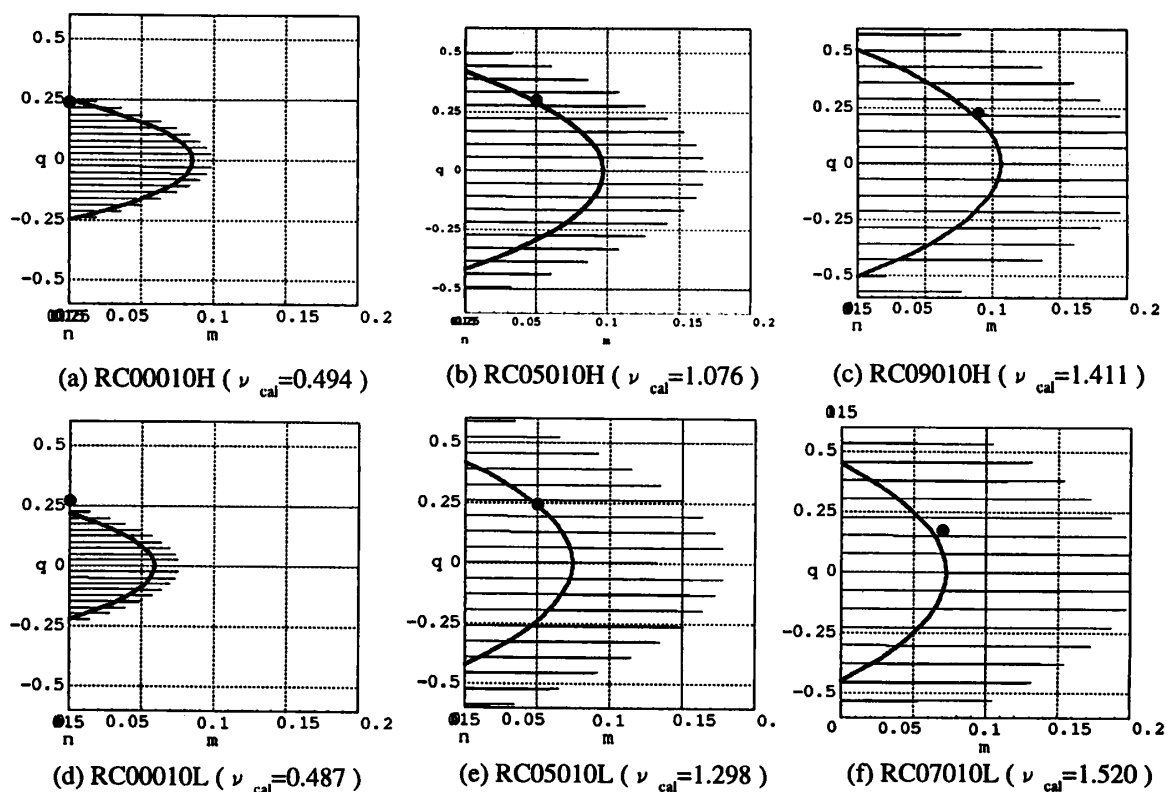


図-9 RCせん断面強度に関する実験値と解析値の比較 (黒丸：実験値、黒線：解析値)

表-3 各試験体の強度の実験結果一覧

| 試験体名     | $q_{ex}$ | $\nu_{cal}$ | $q_{ex}/q_{cal}$ |
|----------|----------|-------------|------------------|
| RC00010H | 0.238    | 0.494       | 0.962            |
| RC05010H | 0.296    | 1.076       | 1.019            |
| RC09010H | 0.229    | 1.411       | 1.158            |
| RC00010L | 0.272    | 0.487       | 1.244            |
| RC05010L | 0.243    | 1.298       | 1.016            |
| RC07010L | 0.174    | 1.520       | 2.308            |

る)。実験値は概ね解析値に近いことがわかる。

表-3に実験値などの一覧を示すが、曲げモーメント（あるいは、垂直ひずみ勾配）が大きくなると有効係数がかなり大きくなる。これは、文献[1]で示すように、コンクリートの曲げ強度が引張強度より大きくなるのと同様に、破壊していない部分のコンクリートがマイクロクラックの進展を抑制し、見かけ上、コンクリート圧縮強度を上昇させるためではないかと考えている。

## 6. 結論

軸力・曲げモーメント・せん断力を受けるRCせん断面の実験について報告した。さらに、無筋コンクリートせん断面に関する有効係数の評価方法に基づき、RCせん断面の有効係数の評

価方法を提案し、本実験との適合性を検討した。その結果、提案した方法により有効係数を算定すれば、ここで報告した6体のRCせん断面の強度を概ね評価できることがわかった。

## 謝辞

本研究は九州共立大学特別研究助成金および有明高専教育研究プロジェクトの助成を受けた。また、実験にあたっては、九州共立大学江崎研究室の卒業生に協力頂いた。加力装置、試験体製作にあたっては、同大学技能員栗山哲生、青木治および生野千力の各氏のお世話になった。ここに、関係各位に対し、深く感謝します。

## 参考文献

- [1] 上原修一、江崎文也：軸力・曲げモーメント・せん断力を受ける無筋コンクリートせん断面の強度に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、vol. 19, No. 2, pp.699-704, 1997.6
- [2] 上原修一、江崎文也：RC板要素せん断面の力学挙動に及ぼす垂直ひずみ勾配の影響に関する実験的研究（第3報 無筋コンクリート試験体について）九州共立大学工学部研究報告第21号、pp.111-118, 1997.3
- [3] 上原修一、江崎文也：RC板要素せん断面の力学挙動に及ぼす垂直ひずみ勾配の影響に関する実験的研究（第4報 鉄筋コンクリート試験体について）九州共立大学工学部研究報告第22号（投稿中）
- [4] UEHARA, S.: Discrete Limit Analysis of Shear Walls by Yield Criterion of RC Shear Planes Considering Bending Moment, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.18 1996
- [5] 上原修一：鉄筋コンクリートせん断面降伏条件に関する基礎的検討、コンクリート工学年次論文報告集、vol. 17, No. 2, pp.845-850, 1995.6