

論文 組み合わせ応力を受ける鉄筋コンクリートせん断面の強度性状

上原 修一*1・江崎文也*2・崎野健治*3

要旨：軸力・曲げモーメント・せん断力の組み合わせ応力を受けるせん断面に、鉄筋が斜めに交わる場合の実験について報告する。次に、このような鉄筋コンクリートせん断面の降伏条件の厳密解を誘導する。さらに、その厳密解を使って、有効係数実験値を求めるとともに、鉄筋応力に関する実験値と解析値を比較する。最後に、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、すでに提案した解析法により、良好に評価できることを示す。

キーワード：極限解析，破壊面，降伏条件，有効係数，剛体ばねモデル

1. 序

複雑な壁配置を有する鉄筋コンクリート（以下，RC）有壁架構の破壊機構を，降伏線（巨視的にみた破壊面であり，ここではせん断面と称する）に基づく極限解析法により，簡便に解析する方法を開発するため，これまで，文献1)において，無筋コンクリートせん断面の実験，文献2)において，鉄筋がせん断面に直交するRCせん断面の実験を，それぞれ報告した。

通常，降伏線と鉄筋は様々な角度で交わることから，せん断面と鉄筋が斜めに交わる場合の検討が必要となる。そこで，本論文では，鉄筋がせん断面に対し45度に交わる試験体4体の実験結果を報告するとともに，このようなせん断面の降伏条件の厳密解を誘導し，実験結果と比較する。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 に試験体一覧を示す。ここで， ψ_1 ：図-1に示す東上り方向鉄筋の力学的鉄筋比（東上り方向の鉄筋比にその鉄筋の降伏点 σ_y とコンクリートシリンダー強度 σ_B の比を乗じたもの），

ψ_2 ：図-2に示す西上り方向鉄筋の力学的鉄筋比（西上り方向の鉄筋について ψ_1 と同様

表-1 試験体一覧

試験体名	ψ_1, ψ_2	载荷 条件	
		n_f	$m_f (e (cm))$
RC00010LD	0.054	0.1	0 (0)
RC50010LD			0.050 (17.5)
RC60010LD	0.048	0.1	0.060 (21.0)
RC70010LD			0.070 (24.5)

表-2 コンクリートの力学的性質

試験体名	$\sigma_B (MPa)$	$E_c (GPa)$
RC00010LD	26.3	27.7
RC50010LD		
RC60010LD	30.0	26.6
RC70010LD		

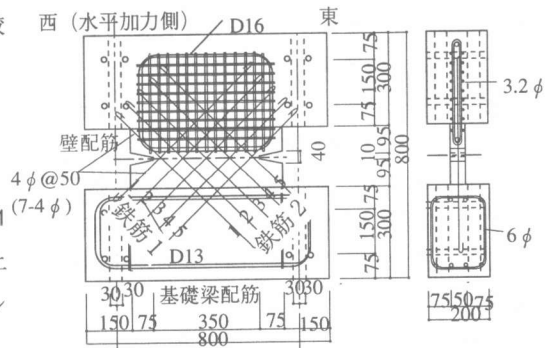


図-1 試験体形状および配筋図

*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）
 *3 九州大学大学院教授 人間環境学研究科、工博（正会員）

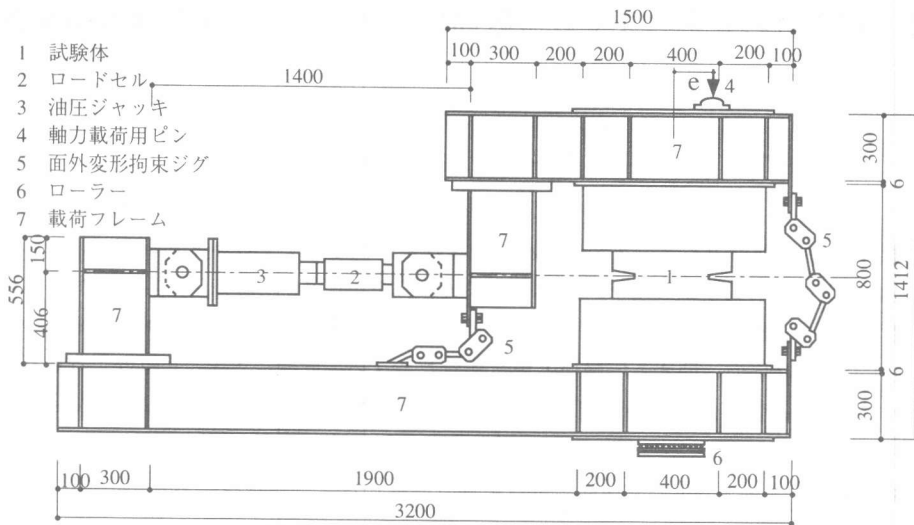


図-2 実験に用いた加力装置

に算定したもの), n_f :せん断面に加わる軸力 N を壁厚 t , せん断面のせい h , σ_B で除し, 無次元化したもの, m_f :せん断面に加わる曲げモーメント M_f を $th^2\sigma_B$ で除し, 無次元化したものである. せん断面 (壁厚 $t=5\text{cm}$, 壁せい $h=35\text{cm}$) を横切る鉄筋は, 図-1 に示すように, せん断面に 45 度に, 2 方向に直交させて配筋した. 鉄筋比は両方向について 0.50% であり, 文献 2) に示す鉄筋比が少ない試験体と同じである. 試験体は 4 体であり, それぞれ荷重条件を変えた. 鉄筋は, 4ϕ (降伏点 $\sigma_y=285\text{MPa}$) で, シングル配筋とし, 均等に配した. 鉄筋には, 図-1 に示すように, 西上がりに配した鉄筋を西側から鉄筋 1 の 1~5 の番号を, 東上がりに配した鉄筋を西側から鉄筋 2 の 1~5 の番号をつけた.

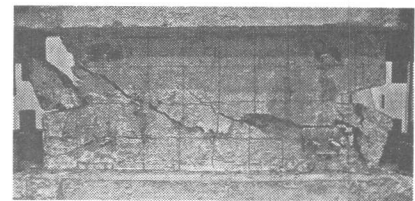
表-2 にコンクリートの力学的性質を示す.

2. 2 加力方法, 測定方法

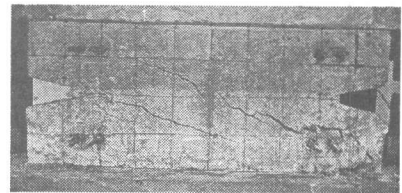
加力方法および変位の測定方法は, 文献 1) に示す方法と同じである. 実験では, 図-2 に示す加力装置を使って, 断面の図心から所定の偏心距離 e だけ離れた位置に一定の軸力 (つまり, 一定の軸力と曲げモーメント) を加えた状態で, 水平荷重を漸増させ, 破壊させた.

3. 実験結果

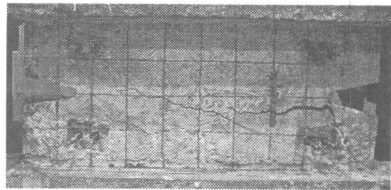
図-3 に試験体の破壊状況を示す. 実験では,



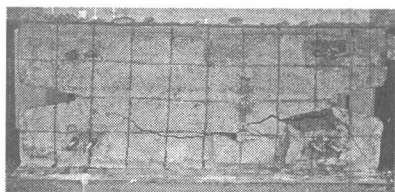
(a) RC00010LD 南面



(b) RC05010LD 南面



(c) RC06010LD 南面



(d) RC07010LD 南面

図-3 試験体の破壊状況

偏心距離 e 大

偏心距離が小さいものほど激しく破壊した。後の表-4に、無次元化水平強度実験値 q_{flex} （水平強度を $th\sigma_B$ で除したもの）を示している。

図-3の破壊状況に示すように、試験体によってはノッチ部分を越えて破壊部が広がっているものがあるが、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、巨視的にはノッチ部分での破壊であるとみなした。なお、この破壊は文献2)の実験でも見られたことから、そこでも詳細な見解を記している。

4. 実験結果の解析

4.1 RCせん断面降伏条件厳密解

文献3)では、鉄筋がせん断面に直交する場合の厳密解を示した。ここでは、鉄筋がせん断面に対し任意の角度で交わる場合の厳密解を示す。ただし、鉄筋は、2方向に直交して配筋されているものとする。

図-4は無次元化曲げモーメント m_{fc} 、軸力 n_{fc} およびせん断力 q_{fc} を受けるコンクリート長方形断面の降伏条件を示す。なお、図中には鉄筋方向の座標である $m_{2c}-n_{2c}-q_{2c}$ 座標および降伏曲面の中心を通る座標である $m_{3c}-n_{3c}-q_{3c}$ 座標も示す。

この降伏条件は、コンクリートの引張強度を無視し、コンクリート強度を最も単純に1軸強度 $v\sigma_B$ （ v ：コンクリート圧縮強度の有効係数）で評価したものであり、次の式(1)で示される⁴⁾。

$$\frac{1}{2} \left(\frac{n_{3c}^2}{v^2} + \frac{q_{3c}^2}{v^2} - \frac{1}{4} \right) + \frac{m_{3c}}{v} = 0 \quad (1)$$

鉄筋の降伏条件は、壁長さ方向に一樣に配筋されている場合は、放物線となり、直交2方向の鉄筋の降伏条件を累加すると、図-5に示すような形状になる⁴⁾。式(2)はその曲面を示す。

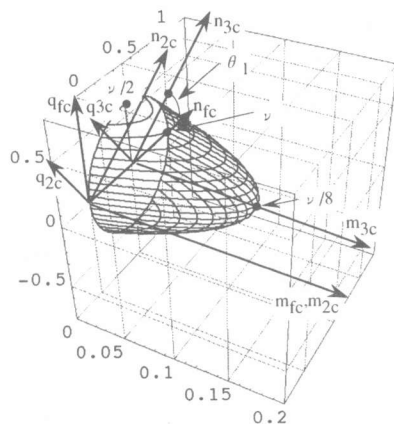


図-4 コンクリートの降伏条件 ($\nu = 1.0$)

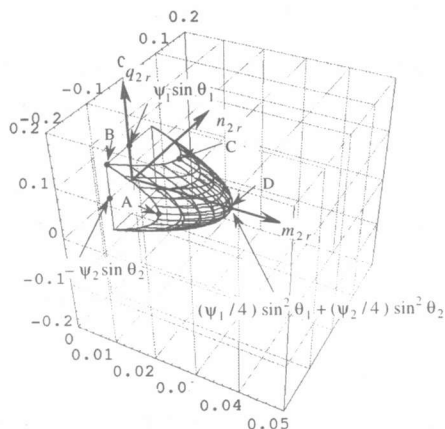


図-5 鉄筋1と鉄筋2の降伏条件の累加 ($\psi_1 = \psi_2 = 0.1$, $\theta_1 = 45$ 度, $\theta_2 = 135$ 度)

$$m_{2r} = -\frac{1}{4} \left(\frac{1}{\psi_1} q_{2r}^2 + \frac{1}{\psi_2} n_{2r}^2 \right) + \frac{1}{4} \left(\psi_1 \sin^2 \theta_1 + \psi_2 \sin^2 \theta_2 \right) \quad (2)$$

ここで、 θ_1 ：せん断面と鉄筋1がなす角度（ここでは45度）、 θ_2 ：せん断面と鉄筋2がなす角度（ここでは135度）である。

図-4と図-5の降伏条件を一般化累加すると、その降伏条件は、図-6のようになる。つまり、図-4の降伏条件を図-5の降伏条件の周り（あるいはその逆）に沿って移動させた時の包絡曲面が、RCせん断面の降伏条件の厳密解となる。

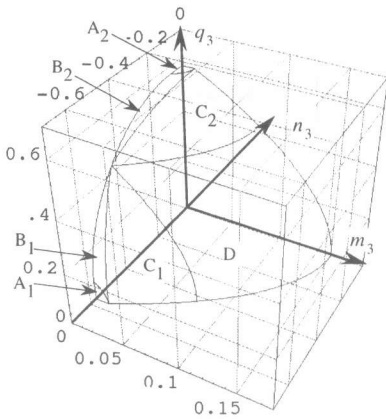


図-6 コンクリートと鉄筋の降伏条件の累加
(RC断面の降伏条件厳密解, $\nu = 1.0$,
 $\psi_1 = \psi_2 = 0.1, \theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 135^\circ$)

その包絡曲面は、いくつかの曲面群からなる。また、それらの曲面群は、図-5の鉄筋の降伏条件のどの部分が包絡曲面に接するかによって定まる。さらに、これらの曲面群を使えば、鉄筋の応力状態、コンクリートの応力状態が決定できる。

表-3に、図-6に示す各曲面での、鉄筋とコンクリートの応力状態を示す。なお、各降伏曲面の式は付録に示すこととする。

4.2 組み合わせ応力を受けるRCせん断面の有効係数実験値

4.1で求めた厳密解を用いればコンクリート圧縮強度有効係数の実験値 ν_{ex} を求めることができる。有効係数の実験値 ν_{ex} は、降伏曲面が丁度、強度実験値を通る時の有効係数として求められる。これらの有効係数実験値を後の表-4に記している。

表-4からわかるように、せん断面の曲げモーメント（あるいは垂直ひずみ勾配）が大きくなると、有効係数が1.0を越えてかなり大きくなる。これは文献(1)でも記したように、垂直ひずみ勾配によりコンクリート強度が大きくなっているためであると考えられる。つまり、本研究においては、軸力とせん断力のみならず、曲げモーメントの相関も考慮していることから、有効係数が1.0より大きくなったといえる。このように、有効係数を、より一般的に、「部材中のコンクリート圧縮強度をシリンダー強度を基に評価する時の係数」として捉えれば、ひび割れなどによる低減と、垂直ひずみ勾配や拘束による増大を連続的に議論できることになる。

4.3 鉄筋応力状態に関する実験値と解析値の比較

図-7に、最大強度時の鉄筋1、鉄筋2の応力値について、実験値と解析値の結果の比較の例を示す。鉄筋応力の解析値を算定するためには、コンクリート圧縮強度有効係数を定めなければならないが、ここでは、4.2で求めた有効係数実験値を用いた。

図-7に示す実験値は、実験で測定した、せん断面をはさむ上下の壁板の相対変形量が、破壊断面に生ずる変形であると仮定し、その変形量をもとに各鉄筋の応力を算出したものである。図-7に示すように、鉄筋1については、解析値と実験値はよく対応している。鉄筋2については、解析値と実験値の間に多少ずれがみられるが、一部圧縮降伏が生ずるなどという定性的な

表-3 RCせん断面降伏条件の厳密解曲面群と鉄筋およびコンクリートの応力状態

曲面	鉄筋1	鉄筋2	コンクリート*
A ₁	弾性	すべて引張降伏	全断面圧縮
B ₁	一部引張降伏・一部圧縮降伏	すべて引張降伏	全断面圧縮
C ₁	一部引張降伏・一部圧縮降伏	すべて引張降伏	断面一部圧縮
D	一部引張降伏・一部圧縮降伏	一部引張降伏・一部圧縮降伏	断面一部圧縮
A ₂	すべて引張降伏	弾性	全断面圧縮
B ₂	すべて引張降伏	一部引張降伏・一部圧縮降伏	全断面圧縮
C ₂	すべて引張降伏	一部引張降伏・一部圧縮降伏	断面一部圧縮

*コンクリートの「全断面圧縮」とは、コンクリート全断面が一様な圧縮力を受け、曲げモーメントを負担しないということ、「断面一部圧縮」とは、コンクリート断面の一部が圧縮力を受け、曲げモーメントを負担するということである。

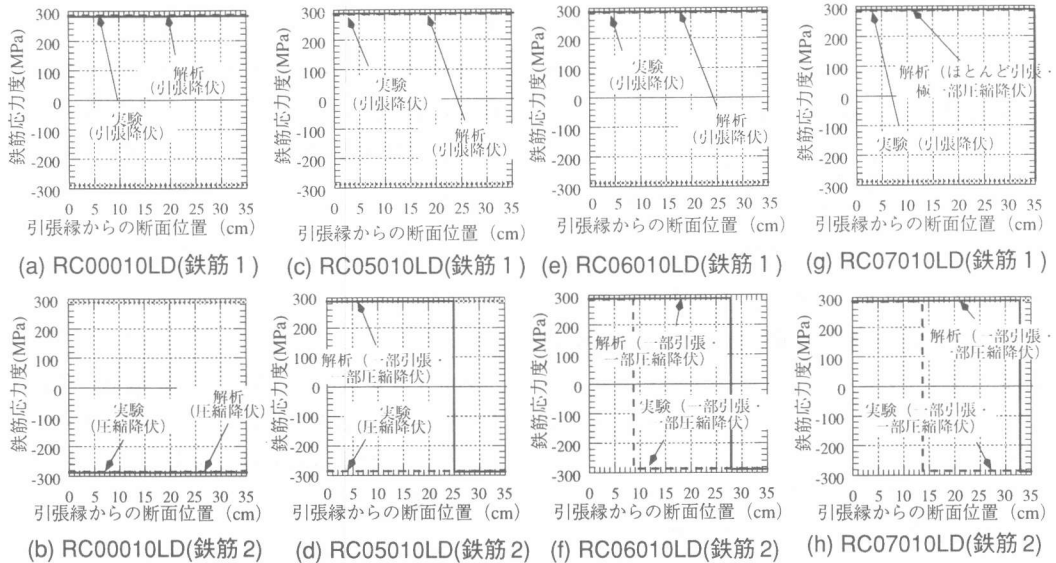


図-7 各試験体の鉄筋応力の解析値と実験値の比較

ところは、ほぼ対応している。

5. RCせん断強度の評価

次に、せん断面での強度実験値と解析値の比較について述べる。

ここで、解析値として4.1で導いた厳密解を用いることが考えられるが、これを用いると降伏曲面が複数になり取り扱いが煩雑になる。そこで、鉄筋比が少ないため近似誤差も十分小さいと見込まれる³⁾ことも考慮し、ここでは文献2)で提案した降伏条件近似曲面を用いることとした。

また、ここで用いる有効係数については、強度の予測値の算定であるという位置づけから、4.2で求めた実験値ではなく、文献2)で提案した、コンクリート強度、軸力、垂直ひずみ勾配の影響を考慮した算定式による計算値 v_{cal} (表-4参照)を用いた。図-8において黒丸が実験値、太い実線が解析値(降伏曲面の裁断面)である(背景の陰は、裁断された降伏曲面である)。実験値は概ね解析値に近いことがわかる。

表-4に実験値などの一覧を示す。なお、ここで無次元化せん断力実験値 q_{fex} (せん断力実験値を $th\sigma_B$ で除したものと)と計算値 q_{fcal} の比

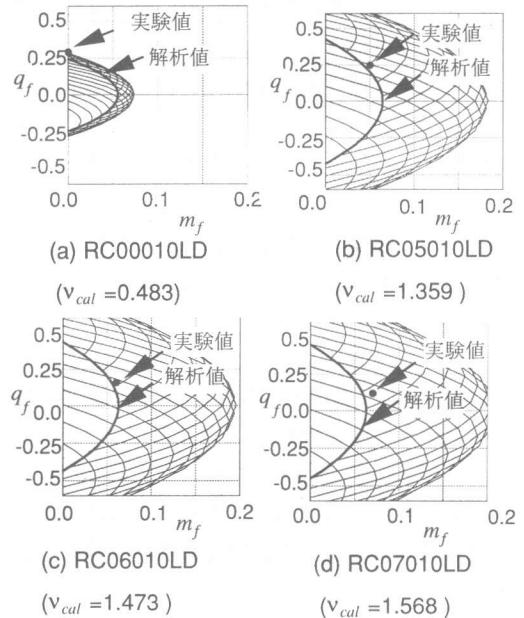


図-8 RCせん断強度に関する実験値と近似曲面による解析値の比較

表-4 各試験体の実験結果一覧

試験体名	q_{fex}	v_{cal}	q_{fex}/q_{fcal}	v_{ex}	曲面
RC00010LD	0.289	0.483	1.183	0.652	B ₂ *
RC05010LD	0.248	1.359	1.240	1.476	C ₂
RC06010LD	0.156	1.473	1.782	1.556	C ₂
RC07010LD	0.119	1.568	-	4.413	D ₂

* 図-6に示すB₂曲面と m_3 - q_3 平面に関し対称な位置の曲面上である。

q_{fex}/q_{fcal} が大きいものがあるが、これは図-8からわかるように、 m_f の変化に対し q_f が大きく変動する領域であるためである。また、RC07010LDについては、図-8(d)からわかるように、 q_f を加えるまでもなく、偏心軸力のみで破壊すると予測される領域にあり、 q_{fex}/q_{fcal} が無限大になることから空欄とした。また、表中に示す各曲面は、実験値が図-6に示す何れの降伏曲面上にあるかを示す。

6. 結論

次に本研究の成果を要約する。

- (1) 軸力・曲げモーメント・せん断力を受けるせん断面に、鉄筋が斜めに交わる場合の実験結果を報告した。
- (2) RCせん断面に鉄筋が斜めに交わる場合の降伏条件厳密解を示した。
- (3) 降伏条件厳密解を用いてコンクリート圧縮強度有効係数の実験値を求めた。また、鉄筋応力状態に関する実験値と解析値との比較から、鉄筋の性状は概ね予測できることを示した。
- (4) すでに提案した降伏条件の近似解による評価方法により強度を計算し、ほぼ実験値と対応することを示した。

付録 直交2方向等分布鉄筋が断面と斜めに交わるRCせん断面の降伏条件厳密解

ここで、図-6に示す各降伏曲面の式を示す。まず、降伏面 A_1 は図-5に示す鉄筋1の降伏面がそのまま包絡面に接する領域であり、次式で示される。

$$n_3 = -\frac{v}{2} - \psi_2 \sin \theta_2 \quad (3)$$

次に、降伏曲面 B_1 は図-5に示す鉄筋の降伏条件の曲線 AB が、コンクリートの降伏条件の $n_3 - q_3$ 平面上を移動する時の軌跡であり、次式で示される。

$$m_3 = \frac{1}{4\psi_1} \left\{ q_3 - \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - (n_3 + \psi_2 \sin \theta_2)^2} \right\}^2 +$$

$$\frac{\psi_1 \sin^2 \theta_1}{4} \quad (4)$$

次に、降伏曲面 C_1 は図-5に示す鉄筋の降伏条件の曲線 AB が、コンクリートの降伏条件の曲面上を移動する時の包絡曲面であり、次式で示される。

$$m_3 = -q_3^2 \frac{1}{2(2\psi_1 + v)} - \frac{1}{2v} (n_3 + \psi_2 \sin \theta_2)^2 + \frac{\psi_1 \sin^2 \theta_1 + v}{8} \quad (5)$$

次に、降伏曲面 D は図-5に示す鉄筋の降伏条件の曲面 $ABCD$ が、コンクリートの降伏条件の曲面上を移動する時の包絡曲面であり、次式で示される。

$$m_3 = -\frac{1}{2(2\psi_2 + v)} n_3^2 - \frac{1}{2(2\psi_1 + v)} q_3^2 + \frac{1}{4} (\psi_1 \sin^2 \theta_1 + \psi_2 \sin^2 \theta_2) + \frac{v}{8} \quad (6)$$

降伏面 A_2, B_2, C_2 は、それぞれ降伏面 A_1, B_1, C_1 の式において、 ψ_1 を ψ_2 に、 θ_1 を θ_2 に、 n_3 を q_3 に、 q_3 を n_3 に置き換え、座標移動について変更した式となる。

謝辞

実験にあたっては、九州共立大学江崎研究室の卒論生に協力頂いた。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：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、コンクリート工学年次論文報告集、vol. 20, No. 3, pp.403-408, 1998.6
- 3) 上原修一、江崎文也、崎野健治：RCせん断面のMNQ相関降伏条件の厳密解—等分布鉄筋がせん断面に直交する場合—、日本建築学会学術講演集（九州）、構造4C-2, 1998.9
- 4) 上原修一：曲げモーメントを考慮したRCせん断面降伏条件による耐震壁の離散化極限解析、コンクリート工学年次論文報告集、vol. 18, No. 2, pp.329-334, 1996.6