

面内せん断力を受ける鉄筋コンクリート平板に関する 破壊モードの推定ならびに終局耐力式の提案

A SEMI-ANALYTICAL METHOD TO PREDICT THE FAILURE MODE AND THE ULTIMATE STRENGTH OF A REINFORCED CONCRETE PANEL SUBJECTED TO IN-PLANE STRESSES

吉川 弘道*・梅原 秀哲**・田辺 忠顕***

By Hiromichi YOSHIKAWA, Hidetaka UMEHARA and Tada-aki TANABE

Analytical approaches as well as experimental studies on the mechanical behavior of reinforced concrete panel-elements where in-plane stresses are dominant, have been carried out intensively so far. In the paper, major theories on the in-plane shear load capacity of a regularly reinforced concrete panel are comprehensively compared. Then, the predictability of these theories is studied, comparing them with experimental results of some 70 specimens in terms of dimensionless descriptions.

Finally, a semi-analytical method to estimate the ultimate shear strength and failure modes of an orthogonally reinforced concrete panel is proposed, based on modified limit analysis methods for both the steel-yielding type and the concrete-crushing type. It is expected that the authors' proposed method can provide simple yet accurate formulae for practical design use.

1. まえがき

壁式あるいは円筒状の重要鉄筋コンクリート（以下これをRCとよぶ）構造物の計画・建設に伴って、面内力を受けるRC部材、すなわち平面応力問題としてのRC平板に関する諸理論が、近年精力的に構築されるようになった。わが国においても、コンクリート製格納容器の建設を契機に面内せん断に関する実証実験が数多く行われ^{1)~3)}、終局耐力に関する各種提案式もいくつか公表されてきた^{4)~6)}。

しかし、既往の実験式では、縦・横に異なる鉄筋または軸力の取扱い方、広範な実験結果との対応、すべての破壊モードを包含していないなど、その精度、適用範囲など、必ずしも十分な検討がなされていたとはいいがたい。そこで、著者らは、各種理論を統一的に比較・評価した後、より一般性のある終局耐力推定式を得ることを試みた。

まず、面内せん断力を受けるRC平板の終局耐力算定に関する既往の主要理論を取り上げ、これらが主とし

て共通座標系における平衡条件(equilibrium condition)により導出し得ることを示し、主要理論の違いが仮定するコンクリートの応力マトリックスの差異に起因することを示した。次に、異なる破壊モードについて、既往理論と過去に発表された約70例に及ぶ実験結果とを比較し、それらの適合性について考察した。

最終的には、主要理論に共通する定性的な特徴を基礎とし、実測データ群との対応を勘案して、面内力を受けるRC平板の耐力式と破壊モードの推定式を半理論的に導いた。また、上記と異なる最近発表された約30例の実験結果と比較し、著者らによる提案方法の適用性を示した。

2. 主要理論の比較・評価

終局に至るまでの変形性状をも含めたRC部材の非線形挙動はきわめて複雑なものとなり、繁雑な式の運用または離散化手法を必要とする。しかし、これを終局耐力（最大強度）の求解に限定した場合、解析手法は比較的単純なものとなり、極限解析(limit analysis)など解析解が得られることも少なくない。本章では、このような観点から国内外の主要理論を取り上げ、その比較・評価を行った。

直交配筋網、コンクリートおよび作用内力3者の応力

* 正会員 (株)間組技術研究所

(〒332 与野市本町西4-17-23)

** 正会員 Ph.D. 名古屋工業大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

Table 1 Stress Matrices for Materials and Applied Forces.

model	Mohr's circle	stress matrices	
		in local coordinate system	in transformed coordinate system
reinforcement		$[\sigma]_e = \begin{bmatrix} R_x & 0 \\ 0 & R_y \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} R_x & 0 \\ 0 & R_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sigma_c \sin^2 \beta & -\frac{1}{2} \sigma_c \sin 2\beta \\ -\frac{1}{2} \sigma_c \sin 2\beta & -\sigma_c \cos^2 \beta \end{bmatrix}$
cracked concrete		$[\sigma]_e = \begin{bmatrix} \sigma_n & \tau_c \\ \tau_c & -\sigma_c \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sigma_n & \tau_c \\ \tau_c & -\sigma_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sigma_c \sin^2 \beta & -\frac{1}{2} \sigma_c \sin 2\beta \\ -\frac{1}{2} \sigma_c \sin 2\beta & -\sigma_c \cos^2 \beta \end{bmatrix}$
internal applied forces		$[\sigma]_e = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sigma_c \sin^2 \beta & -\frac{1}{2} \sigma_c \sin 2\beta \\ -\frac{1}{2} \sigma_c \sin 2\beta & -\sigma_c \cos^2 \beta \end{bmatrix}$

状態は、おののの局所座標にて Table 1 のように応力マトリックスとして表わせる（鉄筋方向を X, Y 座標にとり、これに対して作用荷重の主応力方向を α , ひびわれ直角方向を β とする）。

R_x , R_y は鉄筋の等価応力を表わし、 $R_x=p_x\sigma_{sx}$, $R_y=p_y\sigma_{sy}$ で定義される（ここで、 p_x , p_y はおのの、X と Y 方向の鉄筋比、 σ_{sx} , σ_{sy} はその鉄筋応力を示す）。コンクリートの応力成分のうち σ_n はひびわれ直角方向の応力、 $\sigma_c (\leq f_c)$ はひびわれ方向の応力、 τ_c はひびわれ界面でのせん断応力を表わす（Table 1 参照）。

また、終局時においては、仮定した破壊モードに従ってこれらの諸応力を決定する。たとえば、鉄筋降伏については $R=pf_y$ 、あるいはコンクリート圧壊の場合 $\sigma_c=f_c$ とおけばよい。ここで f_y は鉄筋の降伏強度、 f_c は標準供試体から得られるコンクリートの単軸圧縮強度を示す。

鉄筋コンクリート要素の平衡条件は、任意の共通座標系で表わされた次式によって与えられる。

$$[\sigma_s]_e + [\sigma_c]_e = [F]_e \quad \dots(1)$$

ここで、局所座標から角度 θ だけ座標変換したときのマトリックス変換式は、通常次式で示される。

$$[\sigma]_e = [T]^t [\sigma]_e [T], \quad [T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \dots(2)$$

ここで、 $[]_e$ は局所座標系、 $[]_e$ は変換後の座標系で表わされた応力マトリックスを示し、これらを Table 1 に要約した。

面内せん断耐力を対象とした従来の理論は、上記の関係式より、容易かつ明快に求めることができる。たとえば、Nielsen の場合、鉄筋方向（X-Y 方向）を共通座標として、次式を用いる。

$$[\sigma_s]_{\theta=0} + [\sigma_c]_{\theta=-\beta} = [F]_e \quad \dots(3)$$

Nielsen²⁾は RC 部材に関する塑性理論（plastic theory）のなかで、コンクリートをひびわれ方向の単軸圧縮部材と仮定している。したがって、 $\sigma_c=0$, $\tau_c=0$ となり、式 (3) は次のように書き直せる。

$$\begin{bmatrix} R_x & 0 \\ 0 & R_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sigma_c \sin^2 \beta & -\frac{1}{2} \sigma_c \sin 2\beta \\ -\frac{1}{2} \sigma_c \sin 2\beta & -\sigma_c \cos^2 \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} \quad \dots(4)$$

両方向筋が引張降伏するような破壊モードでは、 $R_x=p_x f_y$, $R_y=p_y f_y$ として次式のような面内せん断式を得る。

$$\tau_{xy} = \sqrt{(p_x f_y - \sigma_x)(p_y f_y - \sigma_y)} \quad (\sigma_c < f_c) \quad \dots(5)$$

同じように、一方向筋（Y 方向）のみが降伏し、コンクリート圧壊を伴うような場合、 $R_x \leq p_x f_y$, $R_y=p_y f_y$, $\sigma_c=f_c$ と考えて、式 (4) より次式が得られる。

$$\tau_{xy} = \sqrt{(p_y f_y - \sigma_y)f_c - (p_y f_y - \sigma_y)} \quad \dots(6)$$

さらに、これは次式のような最大値をとり、鉄筋量に関与されない限界せん断強度となる。

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} f_c \quad \dots(7)$$

鉄筋圧縮降伏のモードに対しても、上記の展開を行うと、最終的に 5 つの耐力式を導くことができる。さらに、これらは平面応力場における 1 連の閉じた降伏条件（failure criterion）を形成し、これを Fig. 1 に示した。図中には、全く同様の方法で導出することが可能となった小野・田中⁵⁾の条件式および Baumann⁷⁾の拡張式をも併記した。このような取扱いは、von-Mises や Drucker-Prager 型などのもっぱら单一材料（岩盤、金属など）に用いられてきた降伏関数（yield function）が、RC 部材のような複合材料にも適用し得ることを示唆するものである。

著者らは、このほか、Martí⁴⁾, Bažant and Tsubaki⁶⁾, Collins³⁾によって定式化された理論式についても、式 (1) を適用して、同様の検討を行った。この結果、基

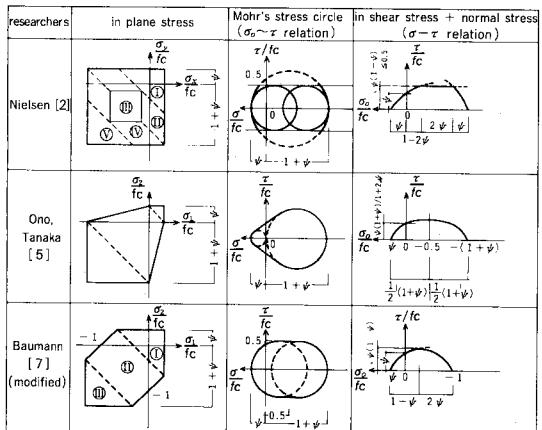


Fig. 1 Failure Criteria of a Reinforced Concrete Panel with Orthogonal and Isotropic Reinforcement.

本的に著者らの示した統一的手法により、おのおのの算定式を明快に導出し得ることがわかった。

たとえば、Bažant, Tsubaki⁶⁾は次式のようにコンクリートのひびわれ界面において、Coulomb 摩擦則を適用した slip-free 則を構築した。

$$|\tau_c| < -k\sigma_n \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

ここで、 k はひびわれ面での摩擦係数を表わす。Marti⁷⁾は、コンクリートの破壊条件として修正 Coulomb 則を採用した。これは、終局時に、コンクリートの引張強度 f_t を用いて、

$$\sigma_n = f_t \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

とすることを意味する。上記の 2 条件は、 $k \rightarrow \infty$ または $f_t \rightarrow 0$ としたとき、Nielsen の両鉄筋降伏型の条件式(5)に帰着し、これら 3 者はともに極限解析に基づくもので、相互に関連性をもつ。

このほか、小野、田中の理論⁵⁾では、RC 部材を等方部材として取り扱い、3 種の破壊モードを導入する一方、極限解析における上下界値を厳密に導出している。また、Collins の提唱する斜め圧縮場理論 (diagonal compression field theory)³⁾では、適合条件と単純化した構成則を導入し、変形解析を行っている。この場合も、耐力式に着目すれば、形式的に Nielsen 式の一部として増えられるが、部材のコンクリートの圧縮強度をそのときの最大せん断ひずみの関数として評価するところが特徴的である。

このように、各理論間の違いが、主として終局時におけるコンクリート応力の仮定の違いに起因するものであり、その他については共通する部分が多い。

各理論の詳細な定式化および数値計算比較については、著者らの既報^{1), 14)}を参照されたい。

以上のように、各理論の相違点が明らかとなったが、いずれがより妥当であるかの判断は、実験値の適合性の上で論すべきであろう。次章にその検討結果を示す。

3. 既往実測結果との比較

これまでに示した主要理論を適用し、既往の内外 8 研究グループによる約 70 体の実測結果^{15)~22)}と比較した。本文で用いた実験は、中空円筒体のねじり加力実験または平板を用いた面内力実験のいずれかによるもので、鉄筋量、膜応力（軸力、内圧、プレストレス力）などが主たるパラメーターとなっている。耐震壁や中空円筒体などの水平加力実験の場合、一様な応力状態ではないため本研究では一応除外した。

また、破壊形式は、I：両鉄筋の降伏、II：一方筋が降伏し、コンクリートが圧縮破壊に至る場合、III：コンクリートの圧縮破壊先行の 3 つに分類する。面内せん断耐力に寄与するパラメーターは、両方向鉄筋の鉄筋量

とその比率、鉄筋の降伏強度、作用する軸応力の大きさ、コンクリート強度などが挙げられるが、本文では次のような f_c で正規化した無次元量を用い、諸算定式を記述した。

$$\eta = \frac{\tau}{f_c}, \xi = \frac{\sigma}{f_c}, \psi = \frac{pf_y}{f_c} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

(式(10)の第 3 式は、一般に鉄筋係数または力学的鉄筋比とよばれる)。多くのマクロモデルは、これら 3 量によりその破壊則を記述することができる。たとえば Nielsen による式(5)は $\eta = \sqrt{(\psi_x - \xi_x)(\psi_y - \xi_y)}$ のごとく表現される（ここで、 ξ , ψ の添字 x , y はそれぞれ X 方向, Y 方向を示す。また、その添字がない場合、両方向の値が等しいことを表わす）。これにより異なる条件下の実測結果と異なる単位系の諸式を同一場で比較することが可能となる（これ以降では、 τ をせん断耐力、 R を降伏時の等価鉄筋応力 pf_y を示すものとする）。

純せん断時の終局耐力 (ψ ～ η 関係) を Fig. 2 に、一方方向軸力下のせん断耐力 (ξ ～ η 関係) を Fig. 3 に示し、実測結果と計算値を比較した。ここで、図中の諸係数のうち、 ν はコンクリート圧縮強度の有効係数²⁾、 r_1 と r_2 は k より決まる定数⁶⁾を表わし、 ζ は $\zeta = f_t/f_c$ で与えられる⁴⁾。

Fig. 2 における実測結果は、鉄筋降伏型の場合、Nielsen あるいはいわゆる全補強式と概略一致しているが、より厳密にみると、 ψ ～ η 直線の勾配は Bažant による Slip-free 解析の勾配とほとんど一致し、 η 軸上の切片は Marti のそれに近くなっている。すなわち、鉄筋係数 ψ の低いレベルではコンクリートの破壊則として Marti の採用した修正 Mohr-Coulomb 則が適当であること、また鉄筋係数の増加に従って slip による鉄筋負荷が大きくなることを示していると判断される。実測結果の回帰直線を求めるとき、 $\eta = 0.85 \psi + 0.024$ が得られ、これを Bažant と Marti の両理論と対応させると、 $k = 1.6$ 、 $\zeta = 0.024$ となる。

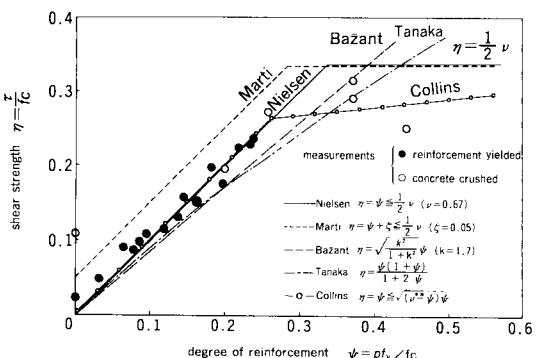


Fig. 2 Comparison with Test Results (ψ - η Relation in Pure Shear Stress).

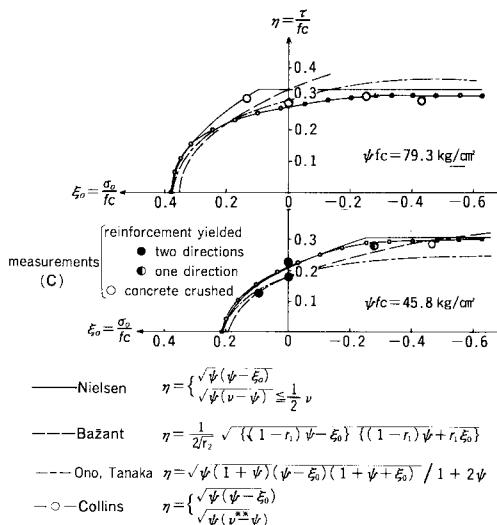


Fig. 3 Comparison with Test Results (ξ_0 - η Relation in Shear Stress and One Directional Normal Stress).

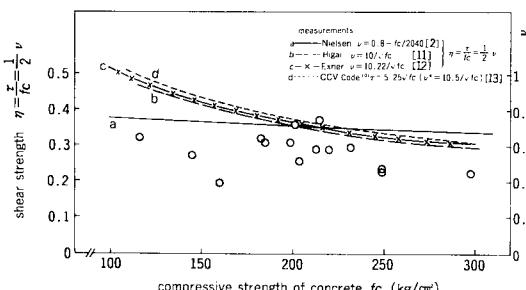


Fig. 4 In-Plane Shear Strength for Concrete-Crushed Failure (f_c - η Relation).

Fig. 3 は鉄筋比を同一とし軸力を変化させたときのせん断耐力の変化をみたもので、同一図中の実測値は鉄筋の等価応力 $R = p f_y$ が等しくなっている（試験体によって f_c がやや異なるため、鉄筋係数 $\psi = p f_y / f_c$ は必ずしも同一ではない）。Fig. 3 の範囲では、各理論の推定精度を厳密に比較し得るものではないが、いずれも実測結果と概略一致し、定性的な実測値の変化をよく説明していると考えられる。しかし、各理論で必要とする諸係数 (ν , ζ , k) は、実測結果と最もよく合うように決められたものであり、実験値と計算値両者がすべての場合に合致しているとはいがたい。

一方、コンクリート圧壊先行型（MODE III）の実測値に着目し、せん断耐力をコンクリートの圧縮強度 f_c によって整理し、Fig. 4 に示した（なお、同図では、コンクリート圧縮強度に関する有効係数 $\nu (0 < \nu < 1)$ を導入し、式 (7) を $\eta = \frac{1}{2}\nu$ と修正することにより、これをコンクリート圧壊先行型のせん断耐力として用いた）。

また、図中には理論式、実験式およびわが国のCCV規準^[3]を加えているが、いずれも実測値と明確な関連性はみられず、計算値は実測データ群に比べて過大値となっている。結局、実測結果を満足する算定式は見当たらぬいが、 η と f_c との若干の相関性が実験的に観測されたといえる。

これまでの考察から、実験値との適合性の向上、算定式の簡素化など、実用的で汎用性の高い耐力評価式を得るには、いくつかの改善点が必要であると考えられた。

4. 面内せん断耐力および破壊モードの推定方法の提案

Nielsen^[2], Marti^[4] および Bažant^[6] による理論式を修正して得られる一般式を基本とし、これを実測データ群との較正によって得られる半理論式を導出する。

破壊モードは、鉄筋降伏型（MODE I, II）とコンクリート圧壊型（MODE III）の2型式のみを考える。また、これ以降の諸式はすべて無次元量で示し、対応する実単位系（kgf-cm系）を括弧内に記した。

(1) 鉄筋降伏型耐力式

純せん断力を受けて、縦横等方鉄筋をもつRC平板の面内せん断強度式の一般形として、次のような一次式を考える。

$$\eta = a\psi + b, \quad (\tau = aR + bf_c) \quad \dots \dots \dots (11)$$

この場合、係数 a , b をおのおの変えることによって Nielsen, Marti, Bažant による各評価式を表現することができる。すなわち、Fig. 2 の注釈に示したように、 $a=1$, $b=0$ とすれば Nielsen 式、 $a=1$, $b=\zeta$ とすれば Marti の評価式、また $a=k/\sqrt{(1+k^2)}$, $b=0$ とおけば Bažant による slip-free 条件と合致する。

ここで、式 (11) を一般的な場合に適用し得るように、次式のような等価鉄筋係数 (equivalent degree of reinforcement) を新しく定義する。

$$\psi^* = \sqrt{(\psi_x - \xi_x)(\psi_y - \xi_y)},$$

$$(R^* = \sqrt{(p_x f_y - \sigma_x)(p_y f_y - \sigma_y)}) \quad \dots \dots \dots (12)$$

ψ (または R) の代わりに、この等価鉄筋係数 ψ^* (または R^*) を代入しても、式 (11) は成立し得ると仮定し、式中の係数 a , b を約 70 例の実測データ群より推定する。そこで、Fig. 2 の MODE I の実測データに、軸力を受けるもの、xy 方向の鉄筋量が異なるものを加え、等価鉄筋係数 ψ^* によって整理し、Fig. 5(a) に図示した。これらの実測データを直線回帰した結果、 $a=0.764$, $b=0.026$ が得られ、鉄筋降伏型のせん断耐力式は次のように示される。

$$\eta = 0.76 \psi^* + 0.026, \quad (\tau = 0.76 R^* + 0.026 f_c) \quad \dots \dots \dots (13)$$

これはまた、純せん断のみを示した Fig. 2 で、 $a=k/\sqrt{(1+k^2)}$, $b=\zeta$ と指摘した事実とも合致し、式 (12)

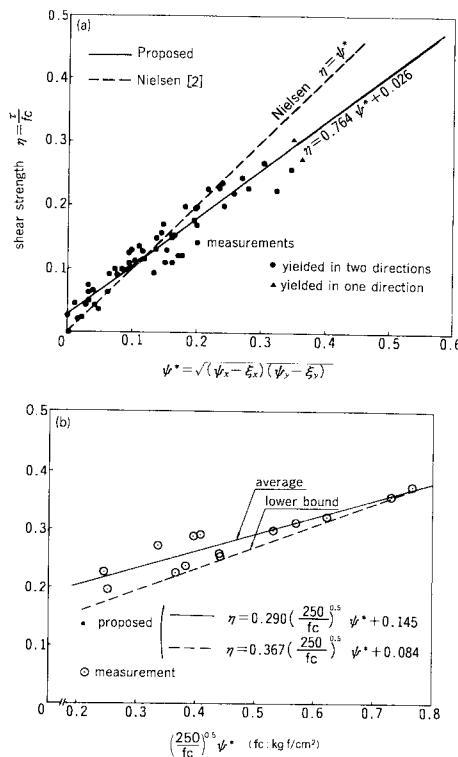


Fig. 5 Test Results and Obtained Regression Lines for a) Reinforcement-Yielding Type and b) Concrete-Crushing Type.

による拡張が妥当であることを示すものである。著者らが定義した等価鉄筋係数によって、異なる条件下の鉄筋降伏型せん断耐力を合理的に説明し得るとともにこれを用いた提案式(13)が、Nielsen式などに比べて明確に実測値と適合していることがFig.5(a)より判断される。

(2) コンクリート圧壊先行型耐力式

この破壊モードの場合、一般に理論的アプローチが難しく、実測結果も大きなばらつきを示すが、その面内せん断耐力は、コンクリート強度 f_c と式 (12) の等価鉄筋係数 ψ^* の両者に依存すると考えられる。そこで、新しい無次元パラメーターとして、 $(f_0/f_c)^{0.5} \psi^*$ を採用しこれによって面内せん断耐力を評価し得ると仮定する。Fig.5(b) は、この無次元パラメーターを横軸にとり、MODE III の実測結果を図示したもので、両者にきわめて明瞭な相関性が認められた。この結果、図中に付記した 2 つの直線式が得られ、このうち直線回帰によって得られた耐力式は次式で表わされる。

$$\eta = 0.29 \left(\frac{f_0}{f_c} \right)^{0.5} \phi^* + 0.145, \\ \left(\tau = 0.29 \left(\frac{f_0}{f_c} \right)^{0.5} R^* + 0.145 f_c \right) \dots \dots \dots \quad (14)$$

以上の中で、 f_0 はコンクリートの基準圧縮強度を示し、本文ではこれを 250 kgf/cm^2 (または、 24.5 MPa など) とした (f_0 と f_c の単位は、同一でなければならない)。

(3) 破壊モードの推定

RC 平板の破壊モードは、直交鉄筋を対象とした場合理論上、 XY 方向の鉄筋強度 ($p_x f_y$ または $p_y f_y$ で与えられる)、作用軸力、コンクリートの有効圧縮強度の大小関係で決定される。しかし、これらすべての組合せについて言及した場合、推定式は非常に繁雑なものとなり、実用的な取扱いは期待できない。

そこで、著者らは、2. で示したマトリックス表示による平衡条件から得られた各モード別の理論式を勘案して、次式に示すきわめて簡単な判別式を導いた。

MODE I $\bar{\phi}_x + \bar{\phi}_y \leq \nu$

MODE II $\bar{\psi}_x + \bar{\psi}_y > \nu$, and $\bar{\psi}_x, \bar{\psi}_y < \frac{1}{2}\nu$(15)

MODE III $\bar{\psi}_x, \bar{\psi}_y \geq \frac{1}{2} \nu$

上式で XY 各方向のパラメーターは、

によって定義される。上式を用いる場合、 $\bar{\psi}_x$, $\bar{\psi}_y$ がともに正値であることを前提とし、これらのうち、いずれかが負値となる場合、その方向での引張破壊を意味し、少しのせん断力も保持し得ないことを示す。この判別式の適用方法については、次章の Fig.7 で図示される。

以上から、本提案法を用いて面内せん断耐力を算出する場合、次のような手順となる。すなわち、与えられた物理条件から、等価鉄筋係数 ψ^* とパラメーター $(f_0/f_c)^{0.5}$ ψ^* を求め、これをもとに式(13)と(14)から面内せん断耐力 η (または τ) を計算すればよい。そして、小さい方の η (または τ) が求める面内せん断耐力となる。

5. 本提案式の適用性についての検討

Fig. 6 は、最近発表された約30例の実測結果 (Vecchio, Collins⁸⁾, 山崎, 八坂ら⁹⁾, 六車, 渡辺ら¹⁰⁾)

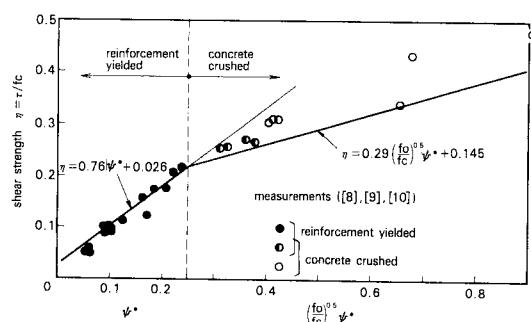


Fig. 6 Proposed Failure Criteria for In-Plane Shear Strength and Recently Available Test Data

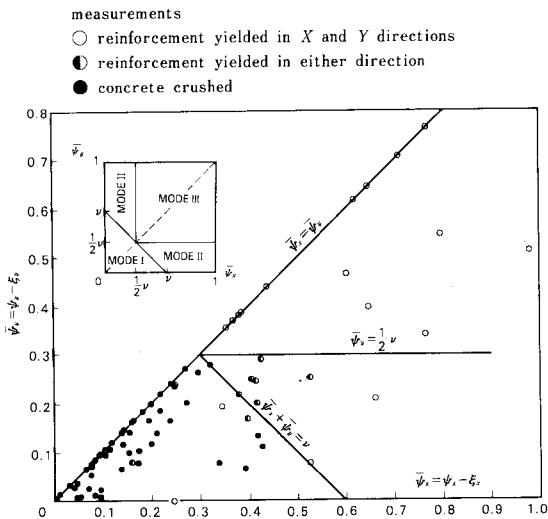


Fig. 7 Classification of Failure Modes and Test Results.

を用い、本方法による計算値と比較したものである。これらの実測結果は、前章で行った各種係数の較正 (Fig. 5 (a), (b)) に用いられたものではなく、本方法の適用性についての検討には適例といえる。同図より判断されるように、鉄筋降伏型の場合、計算値は実験値ときわめてよく一致し、コンクリート圧壊型でもほぼ一致し、実験値の下限値を包絡している。また、Fig. 5, 6 での比較検討は、 $0 < \psi^* < 0.4$, $0.3 < (f_0/f_c)^{0.5} \psi^* < 0.8$ に対して行われたものであり、これらが本手法の確認された適用範囲である。

Fig. 7 は、本文で引用したすべての実測データを採用し、前章で提案した破壊モードの判別式 (15) との適合性を調べるものである (図中では、コンクリート強度の有効係数を $\nu=0.6$ と仮定し、実験データについては、 $\bar{\psi}_x \geq \bar{\psi}_y$ としてプロットした)。各モードの境界近傍と $\bar{\psi}_x$ と $\bar{\psi}_y$ の差が大きい場合やや不明確な点がみられるが、判別式と実測データはほぼ合致し、本手法が破壊モードの推定法として十分使用し得ることを示すものである。

6. ま と め

本研究は、面内力を受ける直交配筋 RC 平板を対象とし、その終局耐力の評価方法について考察を行ったもので、本研究の成果を以下のようにまとめることができる。

(1) 従来より提案されている RC 平板の主要理論式は、著者らが用いた材料応力と作用内力の共通座標系における平衡条件によって容易に導出し得ることを示した。

(2) 著者らの提案する面内せん断力の算定式と破壊

モードの判別式は、XY 方向の鉄筋量や作用軸力の違いおよびコンクリート強度の程度など主たる物理条件を推定手法に反映できる一方、これらを新しく定義した無次元パラメーターにより合理的に取り扱うことができる。

(3) さらに、本提案式は、合計 100 体に及ぶ国内外の広範な実測結果とよく一致することが確認され、その有効性が立証された。

(4) 本提案式は、実測結果との適合性が良好であるばかりでなく、その取扱いが簡便で、実用上の汎用性も併せもつ。したがって、近年検討が進められているコンクリート構造物の限界状態設計法の耐力算定式としても使用し得ると考えられる。

崩壊に至るまでのコンクリート部材のせん断挙動は、きわめて複雑で多くの要因に支配され、より詳細な解析手法が必要とされる。最近の研究は、ひびわれ界面におけるせん断伝達機構、鉄筋の付着とダボ作用、あるいは有限要素法の適用に関するものなど、よりミクロな方向に向かいつつあるように思われる。

一方これとは逆に、より単純な仮定のもとに一般性を失うことなく破壊則を定め、部材レベルから構造系への解析に発展させることも肝要である。特に、設計面への応用、一般構造系の解析手法につながることが望ましい。

著者らはこのような観点のもとに面内せん断問題に関する理論的考察から出発し、本文に示した耐力評価式を提案するに至った。これらの提案式は、直交配筋を有する RC 平板についての合理的で一般性のある耐力式として用いることが可能となろう。

最後に、本文では著者らの実験も含めて国内外の多くの実測結果を参照しましたが、引用させていただきました関係研究者の皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 吉川弘道・梅原秀哲・田辺忠顯：RC 平板の面内せん断強度諸理論の統一的評価ならびにそれに基づく新強度式の提案、第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム、日本コンクリート工学協会、pp. 69~78、昭和 58 年 10 月。
- 2) Nielsen, M. P. : On the Strength of Reinforced Concrete Discs, Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series No. 70, Copenhagen, 1971.
- 3) Collins, M. P. : Towards a Rational Theory for RC Members in Shear, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 104, pp. 649~666, April 1978.
- 4) Marti, P. : Plastic Analysis of Reinforced Concrete Shear Walls, Introductory Report of IABSE Colloquium, Copenhagen, 1979, Plasticity in Reinforced Concrete, pp. 51~69, 1979.
- 5) 小野 薫・田中 尚：鉄筋コンクリート壁体の Limit Design, 日本建築学会論文集, 第 49 号, pp. 42~48,

1954年9月.

- 6) Bažant, Z. P. and Tsubaki, T. : Concrete Reinforcing Nets, Optimum Slip-free Limit Design, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST2, pp. 327 ~346, Feb., 1979.
- 7) Baumann, T. : Zur Frage der Netzbewehrung von Flächentragwerken, Der Bauingenieur, Vol. 47, Heft 10, pp. 367 ~377, 1972.
- 8) Vecchio, F. and Collins, M. P. : The Response of Reinforced Concrete to In-plane Shear and Normal Stresses, University of Toronto, Department of Civil Engineering, No. 82-03, March, 1982.
- 9) 山崎敏敏・八坂厚彦・桜木文敏：熱ひびわれを有する鉄筋コンクリート円筒のねじり加力実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp. 2327 ~2328，昭和59年10月。
- 10) 六串 熙・渡辺史夫・藤井正則：せん断力を受ける鉄筋コンクリート壁の力学的性質に関する実験研究，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，JCI, pp. 705 ~708, 1984年。
- 11) 榎貝 勇：鉄筋コンクリートはりのせん断破壊における塑性理論の検討，第36回土木学会年次学術講演会概要集，pp. 298 ~299, 1981年。
- 12) Exner, H. : On the Effectiveness Factor in Plastic Analysis of Concrete, IABSE Colloquium, pp. 35 ~42, 1980.
- 13) Ohsaki, Y., Ibe, Y. and Aoyagi, Y. : Drafted Japanese Design Criteria for Concrete Containment, SMiRT-6, J 1/2, 1981.
- 14) Yoshikawa, H., Umehara, H. and Tanabe, T. : Comprehensive Evaluation of Major Theories on the Ultimate Strength of Reinforced Concrete Panels Subjected to In-Plane Shear Forces and the Proposed Scmi-Analytical Method for Estimation of Ultimate Strength, Concrete Library of JSCE No. 4, pp. 261 ~281, Dec., 1984.
- 15) Collins, M. P. and Vecchio, F. : Stress-Strain Characteristics of Reinforced Concrete in Pure Shear, Final Report of IABSE Colloquium on Advanced Mechanics of Reinforced Concrete, Delft, pp. 211 ~225, June, 1981.
- 16) 青柳征夫・山田一宇：面内力を受ける鉄筋コンクリートシェル要素の耐力変形特性，土木学会論文報告集，第331号，pp. 167 ~180, 1983年3月。
- 17) 吉川弘道・飯田 剛・角 一行・中川晶夫・山縣博士：コンクリート製格納容器のせん断挙動に関する研究（その1, その2），間組研究年報，pp. 157 ~190, 1982年。
- 18) 中山達夫：内圧を受ける鉄筋コンクリート円筒のねじり試験（Ⅱ），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp. 1391 ~1392, 54年9月。
- 19) 小林正則・小垣善一・吉崎征二・菅野俊介ほか：プレストレストコンクリート円筒壁体のせん断耐力に関する研究（その1～5），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp. 1393 ~1402, 54年9月。
- 20) 内田 明・青柳征夫・山田一宇：鉄筋コンクリート円筒体のねじり実験，土木学会第37回年次学術講演会概要集，V-37, pp. 73 ~74, 57年10月。
- 21) 坪井善勝・富井政英：鉄筋コンクリート無開口単独壁のせん断抵抗に関する研究，建築学会論文集第47号，pp. 49 ~61, 28年10月。
- 22) Oesterle, R. G. and Russell, H. G. : Tangential Shear tests of Reinforced Concrete Containment Element, Nuclear Engineering and Design 59, pp. 99 ~112, 1980.

(1985.3.13・受付)