

面外二軸曲げモーメントを受ける RC 板の実験および解析方法

EXPERIMENT AND ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE PLATES SUBJECTED TO BIAXIAL BENDING MOMENTS

横 沢 和 夫*・二羽淳一郎**

By Kazuo YOKOZAWA and Junichiro NIWA

An analytical method for reinforced concrete plates subjected to biaxial bending moments was proposed in this study. This method divides an original plate into two discrete layers of tension and compression zones. These layers are treated as reinforced concrete plates subjected to membrane force.

In the analysis of the tensile layer, tension stiffening of concrete and shear transfer along the surface of cracks were incorporated. Considering the effect of two-way cracks, the capacity of interface shear transfer was reduced according to the ratio of principal moments.

Moreover, the apparatus for experiments of biaxial bending was newly developed to obtain the accurate test data.

The agreement between analytical results and experimental ones was fairly well and the proposed analytical method was found to be useful to estimate the behavior of reinforced concrete plates subjected to biaxial bending moments.

Keywords: reinforced concrete plates, biaxial bending moments, tension stiffening, interface shear transfer, two-way cracks

1. 序 論

最近、鉄筋コンクリート（以後 RC とよぶ）構造物に要求される設計条件の多様化や構造設計における自由度の増加に伴い、設計上の問題が増加してきている。たとえば原油や LNG を貯蔵するタンクは、安全性や環境上の制約により地下式あるいは半地下式になることが余儀なくされ、側壁には土圧、水圧および地震時の水平力により二方向から面外曲げモーメント（以後面外二軸曲げとよぶ）やねじりモーメントが作用する。一般に、構造物は主モーメント作用方向に配筋するのが原則である。しかし側壁の鉄筋は、作用する応力状態にかかわらず鉛直および水平の直交二方向に配置されるのが通例であるから、主面外曲げモーメントの作用方向と配筋方向が偏向する場合も少なくない。しかしながら、面外二軸曲げを受ける RC 板のうち、主モーメント方向と配筋方向が偏向する場合を対象とした解析方法の提案は少ないのが現状である。この原因の 1 つには、RC 板に面外二軸曲げを与える方法が複雑で検証用の実験データが不

足していたことが考えられる。本論文は、新たに考案した実験装置を用いて、精度の高い RC 板の面外二軸曲げ実験を実施し、さらにそのデータをもとに、この問題に対する解析方法を提案するものである。

2. 面外曲げを受ける RC 板に関する既往の研究

Baumann¹⁾ は、引張力を受ける RC シャイベの解析理論を曲げを受ける RC 板の解析に拡張している。彼の提案は、RC シャイベの解析に適合条件を考慮したことおよびひびわれ方向角を与えているところに特徴がある。

Cardenas ら²⁾ は、面内力を受ける板要素の解析とはり理論を応用して RC 板の変形理論を提案している。主モーメントと配筋の方向が異なる影響は、弾性係数比を低減することにより考慮しているのが特徴である。

しかし、これらの研究においては、耐力の算定を主たる対象としており、変形の評価は十分とはいえない。

角田ら³⁾ は、新たな変形理論を提案している。この提案は、主モーメントと配筋方向が偏向していることにより生ずる二次的なせん断ひずみに対しせん断剛性の低減を考慮する実験定数の導入やコンクリートの引張抵抗寄与を考慮している等、注目すべき特徴を有している。

* 正会員 工博 前田建設工業(株)技術研究所
(〒176 練馬区旭町 1-39-16)

** 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科
(〒464 名古屋市中千種区不老町)

ただし、解析範囲は、ひびわれの発生以後二方向に配筋された鉄筋群のうち、最大主モーメントとの偏向角が小さい方の鉄筋（以後、これを x 鉄筋と称し、偏向角が大きい方の鉄筋を y 鉄筋と称する）の降伏までと比較的狭い領域に限定されている。

その他 Vebo⁴⁾ や Zararis⁵⁾ の提案がみられる程度である。

このように、鉄筋方向と偏向する面外二軸曲げを受ける RC 板の強度と変形の関係を、ひびわれの発生前から終局状態に至るまで、一貫して解析的に評価する方法は得られていないのが現状である。

最近刊行された「コンクリート構造物の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン」⁶⁾ には、サンドイッチ手法による断面設計手法が提案されている。この手法は、曲げの作用している RC 板を圧縮、引張を受ける離散的な RC 平板に区分し、力のつり合い条件のみを考慮して設計する方法である。この方法は、終局状態のみを対象としたものであるといえる。

3. 面外二軸曲げを受ける RC 板の解析方法

本論文で提案する解析方法は、曲げを受ける RC 板の曲げ圧縮域と曲げ引張域に平面保持の仮定を適用し、さらに軸方向の力のつり合い条件を考慮するものであり、通常の RC はりの解析と同様である。

このようにして得られる圧縮合力および引張合力を、RC 板を離散化した上下二層の RC 平板に作用させ、面内力を受ける RC 平板としての解析を行う。なお、実際の計算では引張側平板の解析から出発し、平面保持の仮定と力のつり合い条件より中立軸位置を求め、これを用いて作用する面外曲げモーメントおよび RC 板の曲率を算定している。

以下にその手順を説明する。まず、図-1 に示すように面外曲げを受ける RC 板の曲げ引張域から六車・森田⁷⁾ と同様、鉄筋の位置と図心が一致する厚さを取り出し、これを引張側平板の厚さと定める。このとき鉄筋比は、引張側平板の厚さに対する比とする。

引張側平板には、面内引張力の作用によりひびわれが発生する。本解析では、ひびわれ方向は最大主モーメント

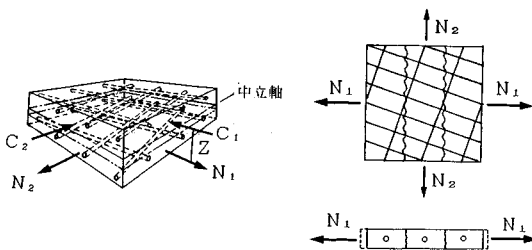


図-1 RC 板と RC 平板

ト M_1 あるいはこれより求まる最大主引張力 N_1 に直交する方向に発生すると仮定している。そして RC 平板に生ずる最大主ひずみ ϵ_{ct} を設定し、解析を進める。4. で説明する引張側平板の解析により、設定した ϵ_{ct} に対応する主引張力 N_1 および N_2 が得られる。

曲げモーメントへの変換は、以下の手順で行う。図-2 に示すような平面保持を仮定することにより、式 (1) を用いてひびわれに直交する断面における圧縮縁ひずみ ϵ'_{cc} が得られる。

$$\epsilon'_{cc} = \epsilon_{ct} \cdot x / (d - x) \dots \dots \dots (1)$$

圧縮を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係を式 (2) で表わし、式 (3) から単位幅当たりの曲げ圧縮力 C'_1 を求める。

$$\sigma'_c = f'_c [2(\epsilon'_c / \epsilon_0) - (\epsilon'_c / \epsilon_0)^2] \dots \dots \dots (2)$$

$$C'_1 = \int \sigma'_c \cdot dx \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 f'_c はコンクリートの圧縮強度であり、 ϵ_0 は 0.2% とした。

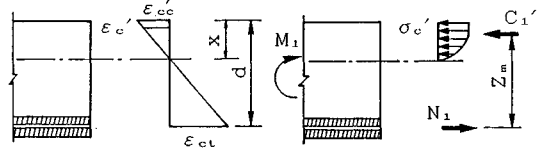


図-2 平面保持の仮定 図-3 軸方向力のつり合い

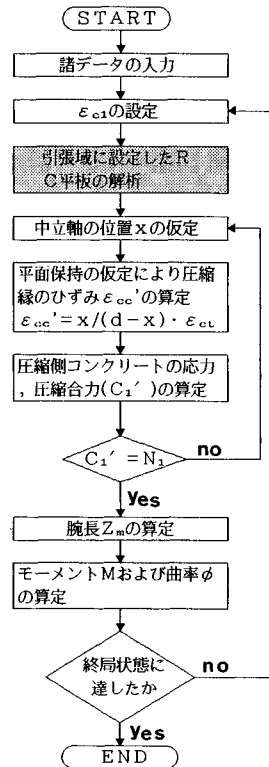


図-4 フローチャート A

図一3に示す断面軸方向のつり合い条件を考慮して $C'_i = N_i$ を満足する中立軸 x を収束計算により求める。 x が得られれば、作用する曲げモーメントおよび曲率が求まる。以上の解析手順を図一4のフローチャートAに示す。なお、終局状態の判定は、以下のいずれかによって行い、終局耐力を算定することとした。

- i) x 鉄筋降伏後圧縮縁のコンクリートひずみ ϵ'_{cc} が 0.35 % に達するとき
- ii) x 鉄筋降伏後 y 方向鉄筋が降伏に達するとき ($\epsilon'_{cc} \leq 0.35 \%$)

4. 引張側平板の解析方法

(1) ひびわれの取扱い

ひびわれの発生から終局に至るまでの鉄筋コンクリートの変形挙動を解析するとき、常に伴う問題としてひびわれの取扱いがある。RC 平板のように均等に配筋された面部材の解析には分散型ひびわれモデルを使用するのが便利であり最近の傾向となっている。したがって本解析においても分散型ひびわれモデルを採用し、ひびわれを含む RC 平板を連続体と仮定することとした。また、コンクリートおよび鉄筋の応力、およびひずみについてもすべて平均的に取り扱うこととした。

RC 平板の力学的性状について検討を加え、その耐力や変形挙動を正確に推定するためには、コンクリートのひびわれ発生条件が必要である。二軸応力下の破壊規準の代表的なものとして Kupfer⁸⁾、青柳・山田⁹⁾の研究が有限要素解析などによく用いられている。著者らの実験では、主モーメント比 K_m (実験で平板に加えた最小主モーメント M_2 と最大主モーメント M_1 の比、 M_2/M_1) が増加しても、表一1に示すようにひびわれ発生モーメントの顕著な低下はみられなかった。そこで本解析においては、二軸引張領域では Kupfer の破壊規準と同様二軸の影響による低減は考えず最大主応力方向のひずみが引張限界ひずみに達したときにひびわれが発生することとした。また最大主応力が一軸引張強度に達した後も、引張限界ひずみに達するまではその応力を保持するものと仮定した。

表一1 試験体の種類と結果の一覧

試験体名	実験要因		実験結果		
	偏向角 θ°	主モーメント比 M_2/M_1	圧縮強度 kgf/cm^2	M_{cr} $\text{tonf} \cdot \text{m}$	M_{1u} $\text{tonf} \cdot \text{m}$
U-0-0	0	0	261	0.98	*
U-12.5-0	12.5	0	289	1.09	4.10
U-17.5-0	17.5	0	305	1.12	3.75
U-22.5-0	22.5	0	252	0.91	3.71
U-30-0	30	0	232	0.84	3.54
U-35-0	35	0	286	1.02	3.61
B-0-0.5	0	0.5	255	0.88	4.02
B-12.5-0.5	12.5	0.5	230	0.98	4.03
B-22.5-0.5	22.5	0.5	243	0.98	3.98
B-30-0.5	30	0.5	262	0.98	3.92
B-22.5-0.75	22.5	0.75	248	0.91	3.92

* 最大耐力が得られていない

面部材では二方向に配筋されるのが通常であり、主モーメントと直交する方向の鉄筋は欠損部となり、ひびわれの発生を助長することになると思われる。したがってひびわれ発生応力度には、岡村¹⁰⁾が提案した一軸引張強度をやや低減した式(4)を用いた。

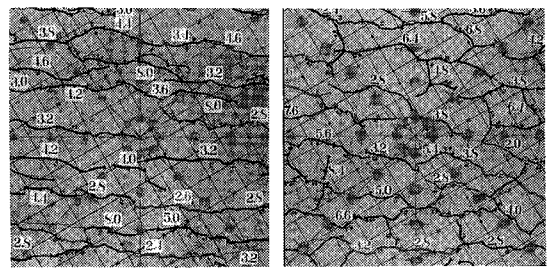
$$f_t = 0.5 f_c'^{2/3} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots(4)$$

RC 平板に発生するひびわれ方向角については、比較的前から研究が進められており、Leitz¹¹⁾、Peter¹²⁾、Baumann、青柳・山田らが提案している。しかしひびわれの形成される方向は、作用する外力のほかにも、試験体の形状や鉄筋の配置等多くの要因に影響され一義的に定めるのは難しいといえる。著者らの実験によれば、初期ひびわれは、最大主モーメントとほぼ直交して形成されることが確認されている。そこで本解析においては、一軸、二軸を問わず初期に形成されるひびわれ方向が終局に至るまで変化しないものと仮定し、その方向は最大主モーメントと直交して形成されることとした。

Baumann や角田らは、支配的なひびわれは常に一方方向に形成されると仮定し解析している。しかし写真一1に示すように、実際には主モーメント比 $K_m = 0.5$ 以上の二軸曲げになると二方向にひびわれが発生している。そこで、この点について考慮するために、本解析においては、支配的なひびわれは常に一方方向に形成されると仮定するものの、二方向に発生するひびわれの影響は無視し得ないとの判断から、二方向ひびわれの影響を後述するせん断剛性の評価に加味するものとした。

(2) ひずみの適合条件

図一1に示したように x, y 両方向に直交配筋された RC 平板の配筋方向と異なった方向に二軸の引張応力を受ける状態を考える。ここに x, y 方向鉄筋とは作用する最大主モーメント M_1 との偏向角がそれぞれ小さい、あるいは大きい方向の鉄筋である。各平均ひずみの相互関係は、図一5に示すモールのひずみ円で表わすことができ、RC 平板の最大主引張ひずみ ϵ_{c1} 、最小主引張ひずみ ϵ_{c2} 、鉄筋方向のひずみ $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ およびひびわれ



* 写真中の数字は実験中の載荷荷重である

写真一1 試験体のひびわれ形成

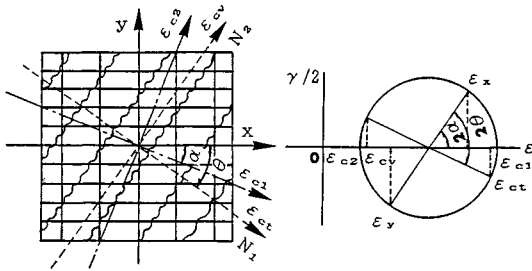


図-5 モールのひずみ円

直交方向のひずみ ϵ_{ct} 、ひびわれ平行方向のひずみ ϵ_{cv} 、せん断ひずみ γ_{ctv} の間に式 (5) および (6) に示す適合条件が成立する。ただし、最大主モーメント方向と x 鉄筋との偏向角を θ 、RC 平板の主ひずみ方向と x 鉄筋とのなす角を α とする。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \epsilon_{c1} \cos^2 \alpha + \epsilon_{c2} \sin^2 \alpha \\ \epsilon_y &= \epsilon_{c1} \sin^2 \alpha + \epsilon_{c2} \cos^2 \alpha \\ \gamma_{xy} &= (\epsilon_{c1} - \epsilon_{c2}) \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{ct} &= \epsilon_{c1} \cos^2(\alpha - \theta) + \epsilon_{c2} \sin^2(\alpha - \theta) \\ \epsilon_{cv} &= \epsilon_{c1} \sin^2(\alpha - \theta) + \epsilon_{c2} \cos^2(\alpha - \theta) \\ \gamma_{ctv} &= (\epsilon_{c1} - \epsilon_{c2}) \sin 2(\alpha - \theta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

(3) コンクリートのテンションステイフニング

コンクリートのテンションステイフニングの影響は、精度の高い変形解析を行ううえできわめて重要である。代表的な提案として Collins・Vecchio¹³⁾、吉川・田辺¹⁴⁾、森田・角¹⁵⁾、白井・佐藤¹⁶⁾、岡村・前川¹⁷⁾ モデルがある。このうち森田・角以外の研究は、いずれも面部材を対象としたモデルの提案である。本解析においては、ひびわれ直交方向の平均応力-平均ひずみ関係に、取扱いが容易でこの種の問題に対する適合性がよい、図-6 に示す岡村・前川モデルを用いることとした。

(4) ひびわれ面でのせん断伝達

ひびわれ面でのせん断伝達に関する最近の研究は、ひびわれ直交方向に伝達される圧縮応力を含めてモデル化されるケースが多い。図-7 は、実測されたひびわれ直交方向の平均ひずみと平均せん断ひずみを示したものである。両者の関係は、終局付近でややせん断ひずみの増加率が増えるものの、ほぼ直線関係にあるとみてよい。このことは、曲げモーメントが増加しても平均ひびわれ幅と平均すべり量の比に大きな変化がないことを示している。李・前川¹⁸⁾によればこのような場合ひびわれ直交方向に伝達される圧縮応力の影響は、小さいことが指摘されている。

そこで、本解析においては、ひびわれ面におけるせん断剛性として、簡便な青柳・山田モデル⁹⁾を用いることとした。ただし、平均せん断剛性を取り扱っているのであるから、ひびわれのない部分のせん断剛性と青柳・山

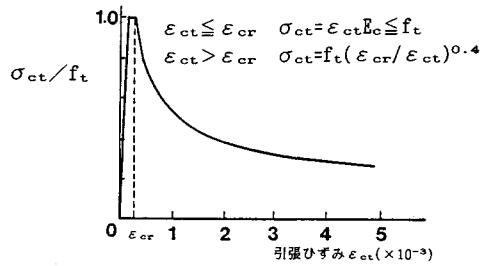


図-6 コンクリートの引張剛性モデル

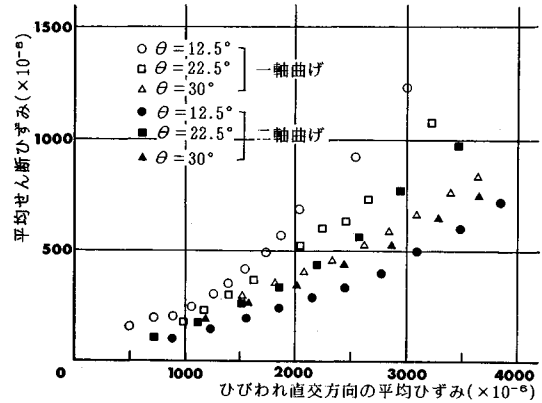


図-7 ひびわれ直交方向のひずみとせん断ひずみの関係

田モデルを直列させて平均せん断剛性を定めた(式(7)中の $\beta=1$ とした式である)。

(5) 二方向ひびわれの影響

これまで述べてきた解析方法は、一方向ひびわれ状態にあるものを対象としている。著者らの行った実験にみられたように、実際には主モーメント比 $K_m = M_2/M_1 = 0.5$ 以上の二軸曲げになると前述したように二方向にひびわれが発生する。しかし二方向にひびわれが形成され、しかも両方向のひびわれが開いた状態におけるモデル化は、十分に確立されているとはいえない。

著者らは、二方向にひびわれが発生すると、鉄筋とコンクリートの付着が劣化することの影響等により、テンションステイフニングやせん断剛性が低下するおそれがあるものと予想した。

鉄筋のひずみについて両者の影響を試算してみると、テンションステイフニングは、 x, y 両方向の鉄筋のひずみ評価に影響を与え、せん断剛性は y 方向鉄筋のひずみ評価に顕著に現われることが判明した。

後述する実験値との比較において、 β による低減を考慮しない解析値は、 x 方向鉄筋のひずみをほぼとらえるものの、 y 方向鉄筋のひずみを過小評価することが明らかとなった。

したがって、二方向ひびわれの影響はせん断剛性モデ

ルに顕著に現われるものと考えたことにした。すなわち二方向の主モーメントの比 $K_m = M_2/M_1 = 1$ で、両方向に完全にひびわれが形成された状態では、せん断伝達能力がほとんど失われるものとみなし主モーメント比 K_m に応じて低減係数 β を導入し、 $\beta = 1 - K_m \leq 1$ で与えることとした。

以上より、二方向ひびわれを考慮したせん断剛性 G_a は、式 (7) に示すようになる。

$$G_a = \beta \cdot G_c \cdot G_{cr} / (G_c + G_{cr}) \dots \dots \dots (7)$$

ここに G_c は、ひびわれのない部分のせん断剛性であり $E_c/2(1+\nu)$ で与えられる。ただし E_c はコンクリートの弾性係数、 ν はコンクリートのポアソン比である。一方 G_{cr} は、ひびわれ部分のせん断剛性であり $36/\epsilon_{ct}$ で与えられる。

また鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係には、ひびわれ面における局部降伏を考慮した岡村・前川・出雲¹⁹⁾の提案する方法を用いた。

(6) つり合い条件

RC 平板に作用する荷重は、鉄筋の応力とコンクリートの応力により抵抗され、両者は重ね合わせることが可能である。RC 平板の x, y 方向のコンクリートの応力は、主ひずみが与えられれば、ひずみの適合条件と応力-ひずみ関係および図-8 に示す Free-Body の力のつり合いから、以下のように求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cx} &= \sigma_{ct} \cos^2 \theta + \sigma_{cv} \sin^2 \theta - \tau_{ctv} \sin 2\theta \\ \sigma_{cy} &= \sigma_{ct} \sin^2 \theta + \sigma_{cv} \cos^2 \theta + \tau_{ctv} \sin 2\theta \\ \tau_{cxy} &= (\sigma_{ct} - \sigma_{cv}) \sin \theta \cos \theta + \tau_{ctv} \cos 2\theta \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

さらに外力と内力のつり合いから式 (9) を得る。

$$\left. \begin{aligned} n_x &= p_x \sigma_{sx} + \sigma_{cx} \\ n_y &= p_y \sigma_{sy} + \sigma_{cy} \\ n_{xy} &= \tau_{cxy} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

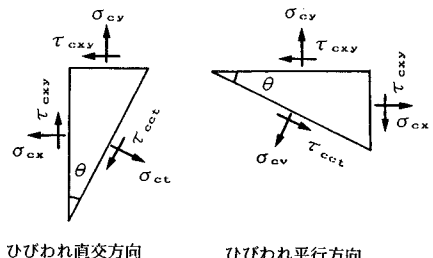
ここに n_x, n_y, n_{xy} は、RC 平板に作用する外力により生ずる x, y 方向の応力、 σ_{sx}, σ_{sy} は鉄筋の平均応力、および p_x, p_y は有効板厚に対する鉄筋比である。

また鉄筋の局部降伏を判定するひびわれ面での鉄筋の応力は、式 (10) より与えられる。このときひびわれ面にはせん断応力のみが存在し、テンションステイニングはないものとした。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{sxcr} &= (n_x \cos \theta + n_{xy} \sin \theta + \tau_{ctv} \sin \theta) / (p_x \cos \theta) \\ \sigma_{syrcr} &= (n_y \sin \theta + n_{xy} \cos \theta - \tau_{ctv} \cos \theta) / (p_y \sin \theta) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

(7) 解析の手順

ここまで述べた関係を用いて、引張側平板の解析を行う。すなわち、設定された ϵ_{c1} に対して、最小主ひずみ ϵ_{c2} および最大主ひずみ ϵ_{c1} と x 鉄筋のなす角 α を仮定する。主引張力と x 鉄筋の偏向角 θ は既知であるから式 (6) より、 $\epsilon_{ct}, \epsilon_{cv}, \gamma_{ctv}$ が求まる。さらに、式 (5)



ひびわれ直交方向 ひびわれ平行方向
図-8 Free-Body の力のつり合い

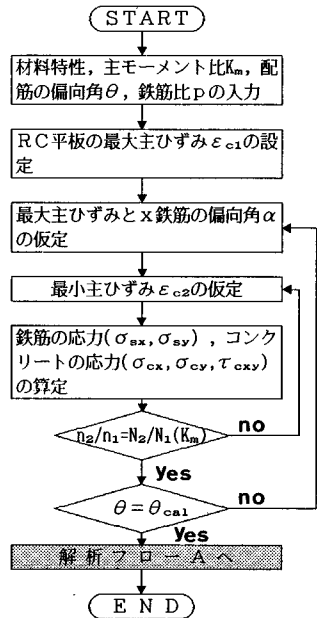


図-9 フローチャート B

より、 $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ が求まる。これより、コンクリートの平均引張応力、せん断応力、および鉄筋の平均応力を求める。次に式 (9) より、これとつり合う外力 n_x, n_y, n_{xy} を求める。 n_x, n_y, n_{xy} は単位幅当たりに作用する主面内力 N_1, N_2 から生ずるものであるから、 n_x, n_y, n_{xy} を変換して得られる主応力 n_1, n_2 の比率は、 N_1 と N_2 の比率に一致しなければならない。また n_x と n_1 のなす角は θ に一致しなければならない。したがって、与えられた ϵ_{c1} に対して、 n_2/n_1 および θ が所定の値に一致するまで、 ϵ_{c2} および α を変化させて繰返し計算を行うのである。以上の手順を、図-9 のフローチャート B に示した。

(8) 既往の実験データによる解析方法の検証

既往の実験データを用いて、RC 平板に対する解析方法の妥当性について検証する。検証用の実験データとしては、RC 平板に一軸および二軸の引張応力を与えた青柳・山田のデータ⁹⁾を用いた。彼らは、150 cm×150 cm、厚さ 10 cm の RC 平板を用いて、鉄筋比、主力と配筋

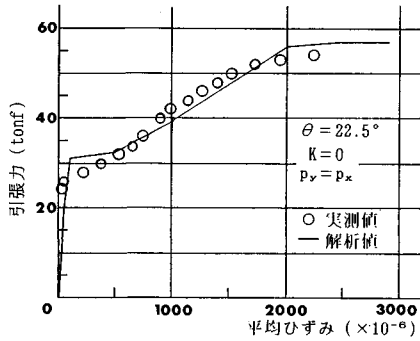


図-10 実測値と解析値の比較 (RC平板の変形 No. 23)

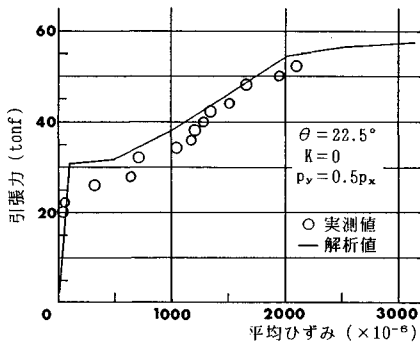


図-11 実測値と解析値の比較 (RC平板の変形 No. 24)

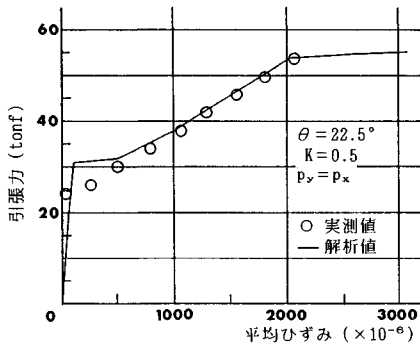


図-12 実測値と解析値の比較 (RC平板の変形 No. 27)

の偏向角 θ および主力比 K をパラメーターとして実験を行っている。このうち鉄筋比は、0.713% および 1.183% の 2 種類である。鉄筋比 0.713% の試験体は、ひびわれ発生後、直ちに鉄筋が降伏する現象が認められ、解析値との比較がしにくいことから、1.183% のシリーズを検証用データとして選定する。図-10～図-12 に主力方向の平均ひずみ ϵ_{ct} に関する実測値と解析値の比較を示す。No. 23 は $\theta = 22.5^\circ$ で x, y 方向鉄筋が等量配筋された試験体である。No. 24 は $\theta = 22.5^\circ$ で y 方向の鉄筋比を x の半分にした試験体である。また No. 27 は $\theta = 22.5^\circ$ で主力比を 0.5 とした試験体である。図にみ

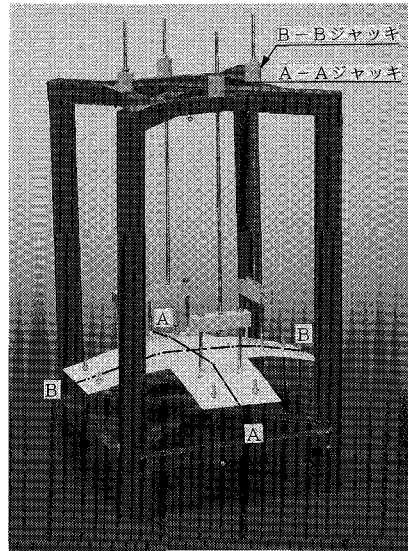


写真-2 連成モデル

られるように解析値は、ひびわれ発生付近を除けば、実測値を精度よく推定できることが認められる。ひびわれ発生荷重を、実測値よりやや高めに評価している原因として、乾燥収縮等の影響により初期引張応力が生じていたことが考えられる。したがって、ここに示した解析方法は、引張力を受ける RC 平板の挙動を十分な精度で予測し得るものといえる。

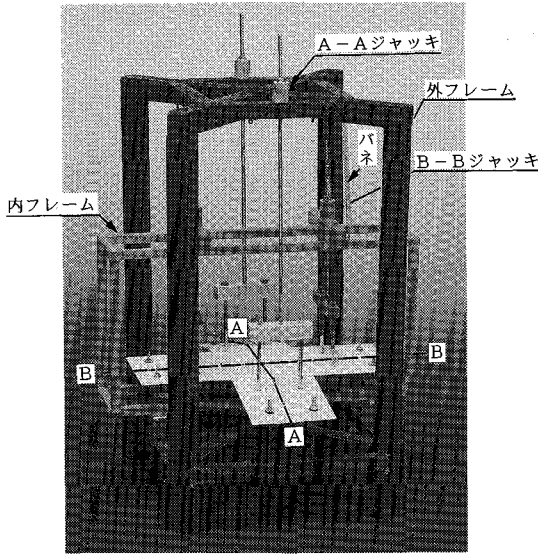
5. RC 板の面外二軸曲げ実験

(1) 面外二軸曲げ実験方法の検討

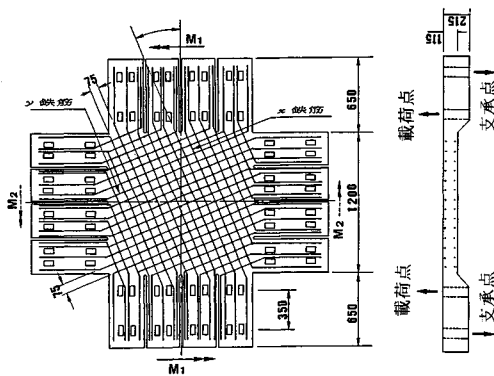
前述したように精度の良い面外二軸曲げ実験データが極端に不足した状態であるため、解析モデルを検証するための面外二軸曲げ実験データを得ることとした。

試験体の形状は、能町・角田・松井²⁰⁾と同様、図-13 に示す十字型を選定した。従来試験体の形状は、矩形が多く、試験区間内で鉄筋端部を定着せねばならない問題があった。この形状の試験体であれば、張出し部に鉄筋端部を定着することが可能となり、問題点の解決が図れる。張出し部による試験区間の拘束に対しては、スリットを設けることによりその影響を除去することとした。

面外二軸曲げ実験の難しさについて、モデルを使用して再現したのが写真-2 である。写真にみられるように A-A 軸方向にのみ曲げを加えているにもかかわらず両軸方向で力が連成し B-B 軸方向にも曲げられていることがわかる。このことは試験区間内に実際に生じているモーメントを定量的に把握することが難しいことを示している。これに対して、写真-3 に示すように両軸を別フレームにし、さらに内フレームを外フレームからば



写真—3 考案したモデル



図—13 試験体の形状・寸法

ねで吊って無重量状態にすれば、この問題点が解決できる。本実験装置の考案により両軸方向を独立して曲げることが可能となり、精度の高い面外二軸曲げ実験データが得られたのである。

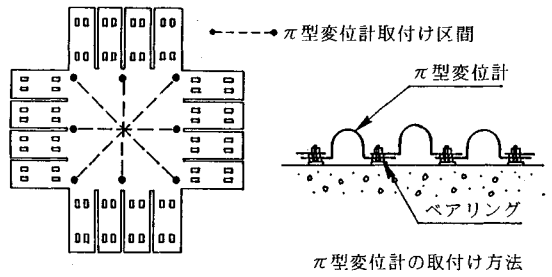
(2) 実験概要

実験に用いた試験体の寸法および配筋状況は、図—13に示すとおりである。

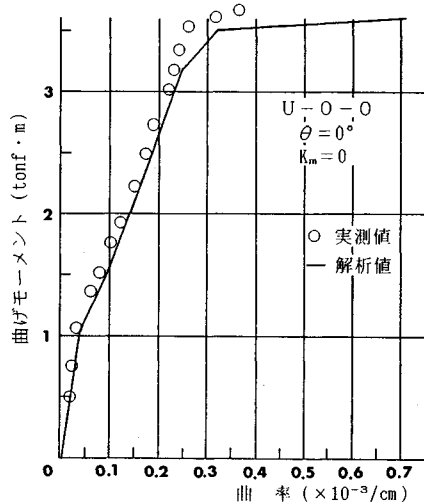
鉄筋は x, y 直交配筋とし、両方向とも D10 を 75 mm 間隔で等配筋した。かぶりは x 鉄筋が鉄筋中心まで 15 mm、 y 鉄筋が 25 mm である。鉄筋は、 $f_{sy} = 3750 \text{ kg/cm}^2$ の降伏点を有している。

実験のパラメーターとして主モーメントと配筋方向の偏向角 θ および最小主モーメントと最大主モーメントの比 $K_m = M_2/M_1$ ($M_1 \geq M_2$) を選定した。

試験体の一覧を表—1 に示す。同表には、コンクリートの圧縮強度、ひびわれ発生モーメント M_{cr} および最



図—14 引張縁の変位測定



図—15 変形に関する実測値と解析値の比較

大モーメント M_{1u} を併せ示した。

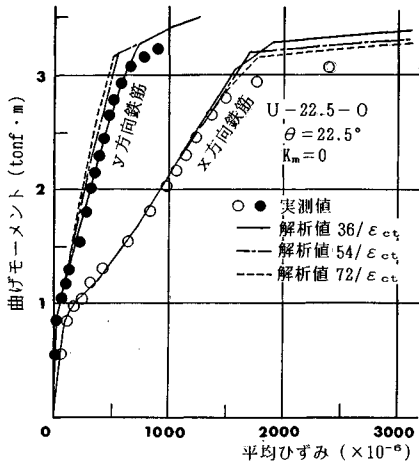
また測定項目は、鉄筋の平均ひずみ (全測点 27 点の平均とした)、引張縁の平均ひずみ (主モーメント方向および対角方向)、圧縮縁の平均ひずみ (引張縁と同様) および平均ひびわれ幅である。

鉄筋および圧縮縁の平均ひずみは、ワイヤストレインゲージにより、また引張縁の平均ひずみおよび平均ひびわれ幅は、図—14 に示すように π 型変位計を引張縁に連続的に取り付け測定した。 π 型変位計は脚部にベアリングを挟み、ねじれの影響を極力除去するようにした。測定の詳細は、著者の文献²¹⁾ に示す。

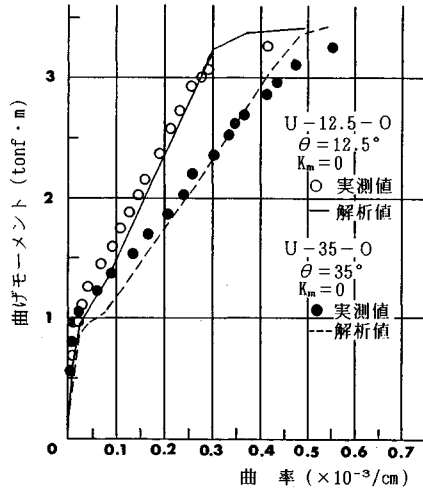
6. 実験データによる面外二軸曲げ解析方法の検証

(1) 面外一軸曲げデータの解析

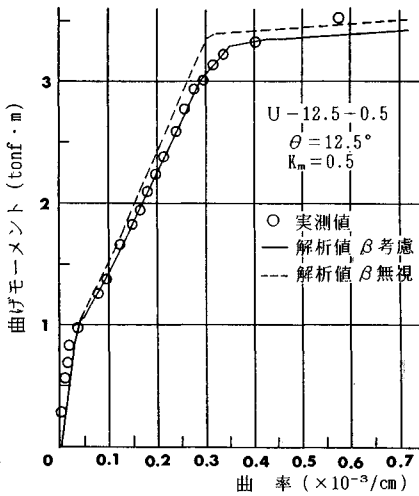
まず最初に面外一軸曲げデータに対し解析を行った。各要因に対する感度解析を行ったところ本試験体のように x, y 方向が等量配筋されていると、曲率に及ぼす影響はテンションステイフニングが最も大きいことが明らかとなった。せん断伝達は曲率に及ぼす影響は小さいものの、鉄筋のひずみ、特に y 方向鉄筋ひずみに及ぼす



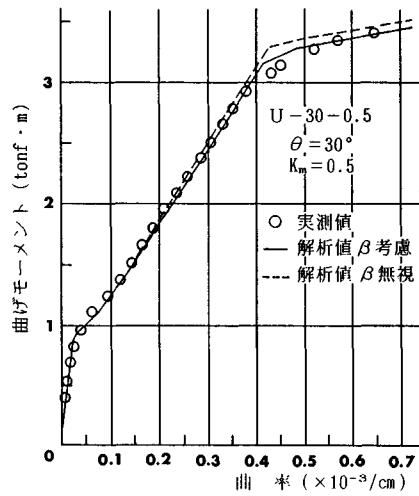
図一16 鉄筋のひずみに関する実測値と解析値の比較



図一17 変形に関する実測値と解析値の比較



(a) $\theta=12.5^\circ, K_m=0.5$



(b) $\theta=30^\circ, K_m=0.5$

図一18 変形に関する実測値と解析値の比較

影響が大きい。

図一15は、主モーメント方向に配筋された試験体のモーメント-曲率関係について実測値と解析値を比較したものである。

図にみられるように実測値と解析値は、ほぼ一致している。これは、解析に用いているテンションステイフィングの評価が妥当であることを示している。

図一16はひびわれ面でのせん断剛性を $36/\epsilon_{ct} \sim 72/\epsilon_{ct}$ まで変化させたときの鉄筋の平均ひずみについて実測値と解析値を比較したものである。図にみられるように本解析で用いているひびわれ面でのせん断剛性 $36/\epsilon_{ct}$ は y 方向鉄筋に対する実験値との対応が最もよいことから妥当であると判断した。

面外一軸曲げを受けるRC板では、主モーメント方向と配筋方向の偏向角 θ が大きくなると、RC板の曲げ剛性が低下し変形が増大する傾向が顕著に現われるのが大きな特徴である。

図一17は、モーメント-曲率関係について実測値と解析値を比較したものである。解析値は、この特徴をとくたっている。

以上より、本解析方法は、面外一軸曲げを受けるRC板の変形をひびわれの発生から終局に至るまで精度良くとらえると考えられる。

(2) 面外二軸曲げデータの解析

a) 変形に関する比較

図一18は面外二軸曲げを受けるRC板の曲げモーメ

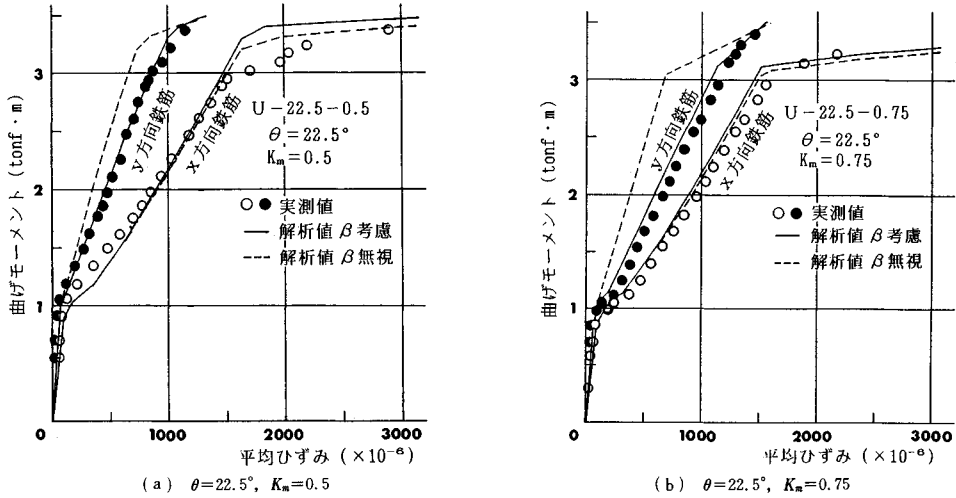


図-19 鉄筋のひずみに関する実測値と解析値の比較

表-2 終局耐力に関する実測値と解析値の比較

試験体名	実験結果		計算値 tonf·m	実験値 計算値
	圧縮強度 kgf/cm ²	M _{1,u} tonf·m		
U-12.5-0	289	4.10	3.78	1.08
U-17.5-0	305	3.75	3.76	1.00
U-22.5-0	252	3.71	3.62	1.02
U-30-0	232	3.54	3.62	0.98
U-35-0	286	3.61	3.68	0.98
B-0-0.5	255	4.02	3.78	1.06
B-12.5-0.5	230	4.03	3.70	1.07
B-22.5-0.5	243	3.98	3.68	1.08
B-30-0.5	262	3.92	3.69	1.06
B-22.5-0.75	248	3.92	3.77	1.04
平均値=1.03 変動係数=4.8%				

ント-曲率に関して、また図-19は曲げモーメント-鉄筋の平均ひずみに関して実測値と解析値の比較を示したものである。

本論文に示した面外二軸曲げ解析方法は、曲げ圧縮域と引張域間に変形の適合条件を考慮しているため変形が終局まで追跡できること、およびせん断剛性に対する低減係数 $\beta = (1 - K_m)$ を導入したことに特徴がある。図にみられるように曲率、鉄筋の平均ひずみともひびわれの発生から終局に至るまで実際の挙動を精度良くとらえていることが認められる。また同図には、 β を考慮しない場合の解析値も併せ示した。

β を考慮しないことの影響は、 y 方向鉄筋のひずみの評価に顕著に現われる。このことは、 β を考慮しないと x 方向に比して y 方向の鉄筋比が低いようなときに変形を過小に評価する危険性があることを示唆している。

b) 終局耐力の検証

本解析においては、前述のように終局状態を RC 板の①圧縮縁のコンクリートひずみが 0.35% に達するか、② y 方向鉄筋が降伏に達したときとして、終局耐力

を算定している。表-2は、解析により求められた終局耐力と実験により得られた終局耐力を比較したものである。ここでは、二軸曲げを受ける RC 板ばかりでなく一軸曲げを受ける RC 板の実験結果も含めて比較した。

本解析によれば 10 個の実験データに対して実験値と計算値との比を平均値 1.03、変動係数 4.8% で評価することができる。やや平均値が高いものの十分な精度で面外二軸曲げを受ける RC 板の終局耐力を推定できるのである。

7. 結 論

本研究の結果得られた結論は、以下のとおりである。

(1) RC 板に対して二軸の面外曲げモーメントを相互に独立して作用させることのできる試験装置を新たに考案した。この装置により、二軸の面外曲げを受ける RC 板の強度-変形挙動に関する精度の良い実験データを得ることができた。

(2) 平面保持の仮定と断面内の力のつり合い条件を考慮し、面外曲げを受ける RC 板の問題を、上下二層の面内力を受ける RC 平板の解析に置き換えることにより、RC 板の強度-変形関係を推定する方法を提示した。本解析方法によれば、単調比例載荷時の曲げモーメント-曲率関係、曲げモーメント-鉄筋の平均ひずみ関係を精度良く推定することが可能であり、また終局耐力に関しても同様に高精度で評価できる。

(3) 面内力を受ける RC 平板の解析において、主モーメント比 $K_m \geq 0.5$ の場合に発生する二方向ひびわれの影響を、せん断剛性低減係数 β という形で間接的に評価したが、簡易なモデルであるにもかかわらず、 y 方向鉄筋の平均ひずみに対する算定精度を高めることが

できた。

謝 辞：本研究を遂行するに際し、終始ご助言下さいました日本大学理工学部教授 川口昌宏博士、山梨大学工学部教授 梶貝 勇博士ならびに前田建設工業技術研究所 山田一字博士に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Baumann, Th. : Tragwirkung orthogonaler Bewehrungsnetze beliebiger Richtung in Flächentragwerken aus Stahlbeton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 217, 1972.
- 2) Cardenas, A. E., Lenschow, R. J. and Sozen, M. A. : Stiffness of reinforced concrete plates, Proc. of ASCE, Vol. 98, ST 11, pp. 2587~2602, Nov., 1972.
- 3) 角田与史雄・堺 孝司・能町純雄：鉄筋コンクリートの曲げモーメント-曲率関係について，土木学会論文報告集，第 317 号，pp. 137~147, 1982 年 1 月
- 4) Vebo, A. and Amin, G. : Moment-curvature relation of reinforced concrete slabs, Proc. of ASCE, Vol. 103, ST 3, pp. 515~531, Mar., 1977.
- 5) Zararis, P. D. : Failure mechanisms in RC slabs, Proc. of ASCE, Vol. 114, ST 4, pp. 1908~1927, May, 1988.
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン，1989 年。
- 7) 六車 照・森田司郎：鉄筋コンクリート梁の変形ときれつ，日本建築学会論文報告集，第 90 号，pp. 13~18, 1963 年 9 月。
- 8) Kupfer, H. B., Hilsdorf, H. K. and Rüsck, H. : Behavior of concrete under bi-axial stresses, Proc. of ACI, Vol. 66, No. 8, pp. 656~665, Aug., 1969.
- 9) 青柳征夫・山田一字：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。
- 10) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法，共立出版。
- 11) Leitz, H. : Eisenbewerte Platten bei allgemeinem Biegunszustande, Die Bautechnik, Heft 16 und 17, 1923.
- 12) Peter, J. : Zur Bewehrung von Scheiben und Schalen für Hauptspannungen schiefwinklig zur Bewehrungsrichtung, Die Bautechnik, Heft 5 und 7, 1966.
- 13) Vecchio, F. J. and Collins, M. P. : Response of reinforced concrete to in-plane shear and normal stresses, Publication No. 82-03, University of Toronto, Mar., 1982.
- 14) 吉川弘道・田辺忠顕：鉄筋コンクリート部材の引張剛性に関する解析的研究，土木学会論文集，No. 366/V-4, pp. 93~102, 1986 年 2 月。
- 15) 森田司郎・角 徹三：鉄筋コンクリート部材の引張試験による付着効果の研究，セメント技術年報，No. 18, pp. 426~430, 1964 年。
- 16) 白井伸明・佐藤稔雄：鉄筋コンクリートの付着-ひびわれモデル，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論文集，pp. 9~18, 1983 年 10 月。
- 17) 岡村 甫・前川宏一：鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素解析，土木学会論文集，No. 360/V-3, pp. 1~10, 1985 年 8 月。
- 18) 李 宝禄・前川宏一：接触面密度関数に基づくコンクリートひびわれ面の応力伝達構成式，コンクリート工学，Vol. 26, No. 1, pp. 123~137, 1988 年 1 月。
- 19) Okamura, H., Maekawa, K. and Izumo, J. : Reinforced concrete plate element subjected to cyclic loading, Proc. of IABSE Colloquium Delft, pp. 575~589, Aug., 1987.
- 20) 能町純夫・角田与史雄・松井 司：鉄筋コンクリートスラブの変形特性に関する研究，セメント技術年報，No. 30, pp. 496~498, 1976 年。
- 21) 横沢和夫・川口昌宏：1 軸および 2 軸曲げモーメント作用下の RC 板の挙動，日本大学理工学部研究所報，Vol. 68, pp. 11~30, 1988 年 11 月。

(1989. 9. 1・受付)