

軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の 弾塑性解析方法

松本 進

(受理 昭和59年 5 月31日)

ANALYTICAL STUDY OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS SUBJECTED TO AXIAL FORCES AND BI-AXIAL BENDING MOMENTS

Susumu MATSUMOTO

In this paper an analytical method for determining the numerical results on the axial force and bi-axial bending moment of reinforced concrete members were studied. First, a computer program was developed based on the elasto-plastic theory using the equilibrium equations of horizontal forces and bending moments. Secondly, the mechanical characteristics of the members were examined numerically by the above computer program under various factors. From the results obtained by this analysis, the mechanical characteristics of reinforced concrete members can be better understood, both qualitatively and quantitatively.

1. 緒 言

鉄筋コンクリート構造物が任意の方向から地震外力を受けると、一般的にはこの種の問題は軸力・二軸曲げの問題となる。この種の研究としては、1950年代頃から鉄筋コンクリート柱の耐力に関する研究等で数多く行なわれており、欧米においてはこれに対する設計方法が実用的に確立されている。しかしながら、これらの研究は常時荷重を念頭においたものであって、地震荷重を対象にしたものではなかった。また、比較的最近発生したサンフェルナンド地震や十勝沖地震によって、軸力・二軸曲げが原因と考えられる鉄筋コンクリート柱の破壊が多数見受けられ、これが引金となってここ 10 年の間に軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の実験・研究がかなり活発に行なわれるようになってきた。

軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の解析で一番大きな問題点としては、外力の作用方向と中立軸を結ぶ線が必ずしも一致しないことや軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の破壊曲面が軸力・一軸曲げから得られる破壊曲面の回転曲面とはならないことが挙げられる。この様な問題に対して多く

の研究者が研究を行い、それぞれに良好なる成果を収めているものの、現在までの所統一された成果を出すまでには至っていないように見受けられる。

本研究では、上記の事情に鑑み最近手軽に利用が可能となってきたマイコンを利用して、まず軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の弾塑性領域までを含めた解析プログラムを作成し、さらにこの解析プログラムによって軸力・二軸曲げに及ぼす諸要因について詳細に検討を行い、鉄筋コンクリート部材のこの種の力学的特性を解析的に明らかにするものである。

2. 解析方法

2. 1 解析に用いた仮定

解析をするに当っては以下の仮定を用いた。

- (1) 鉄筋とコンクリートには平面保持が成立する。
- (2) コンクリートの引張応力は無視する。
- (3) コンクリートの応力・歪曲線は図 1 に示すような 2 次曲線と直線から成るものを用いた。
- (4) 鉄筋の応力・歪曲線は図 2 に示すようなバイ・リニヤ型のものを用いた。

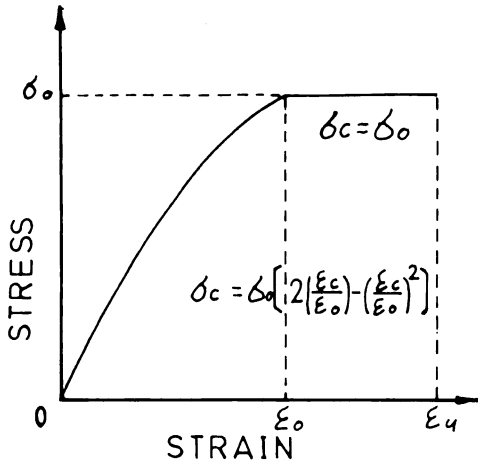


図-1 コンクリートの応力・歪曲線

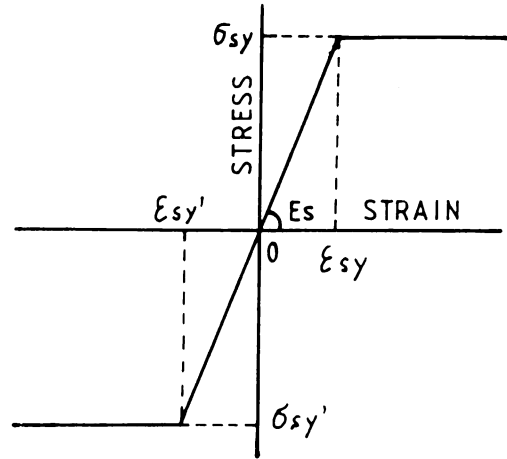


図-2 鉄筋の応力・歪曲線

2. 2 解析方針

一般に、鉄筋コンクリート部材に軸力・二軸曲げが作用すると、軸力の大きさならびに二軸曲げの比率によって中立軸が図-3に示した様に断面主軸に対してある角度 α を有することになる。そこで、まず任意の中立軸の角度 α を設定し、次に中立軸垂直方向に偏心量 e を与える。さらに、内力の大きさを決定するためにコンクリートの最外縁の圧縮歪 ϵ_{cc} を与え

る。最終的には、鉄筋およびコンクリートのそれぞれの内力ならびに曲げモーメントを計算し、内力による偏心量が外力による偏心量 e に等しくなるまで、中立軸 x を適当に変えて計算を繰返し、等しくなればこの時の軸力と曲げモーメントが偏心量 e およびコンクリート歪 ϵ_{cc} となる場合の求める軸力と曲げモーメントになるわけで、この様な方法を繰返し計算することによって解析することにする。

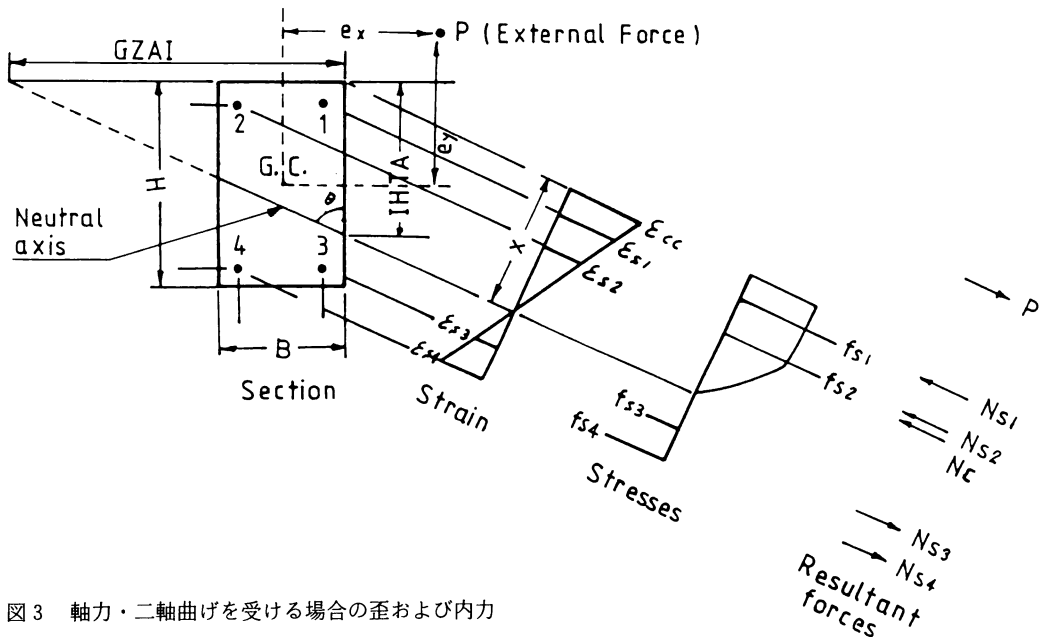


図3 軸力・二軸曲げを受ける場合の歪および内力

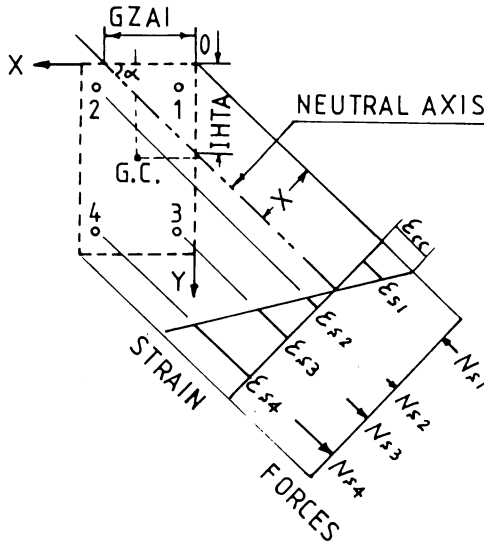


図-4 鉄筋の内力

2. 3 解析方法

(1) 鉄筋に作用する内力および曲げモーメント

図-4に示した様に、断面内にある鉄筋に1. ... nの番号をつけ、断面の右上隅を原点としたXY座標系を考え、各鉄筋位置は (x_i, y_i) で与えられているものとする。いま、コンクリートの最外縁の歪 ϵ_{cc} と任意の x は与えられているものとする、中立軸がX軸およびY軸とそれぞれをきる切片の大きさGZAIおよびIHTAは図形の性質から簡単に求まる。そこで、任意点にある鉄筋の歪 ϵ_{si} ならびに軸力 N_{si} はこの ϵ_{cc} 、GZAIおよびIHTAを使えば次式の様に表わせる。

$$\epsilon_{si} = \epsilon_{cc} \times \left(1 - \frac{x_i}{\text{GZAI}} - \frac{y_i}{\text{IHTA}}\right) \quad \text{---①}$$

$$N_{si} = A_{si} \times \epsilon_{si} \times E_{si} \quad \text{---②}$$

従って、鉄筋による総軸力 N_s はこれらの総和であるので、次式となる。

$$N_s = \sum_{i=1}^n N_{si} \quad \text{---③}$$

次に、図心においてX軸およびY軸まわりの鉄筋の曲げモーメントを M_{sx} および M_{sy} とすると、 M_{sx} および M_{sy} は次式で求められる。

$$M_{sx} = \sum_{i=1}^n N_{si} \times \left(\frac{H}{2} - y_i\right) \quad \text{---④}$$

$$M_{sy} = \sum_{i=1}^n N_{si} \times \left(\frac{B}{2} - x_i\right) \quad \text{---⑤}$$

よって、任意のXY方向の鉄筋の曲げモーメント M_{sxy} は④と⑤から簡単に求められる。

$$M_{sxy} = \sqrt{M_{sx}^2 + M_{sy}^2} \quad \text{---⑥}$$

(2) コンクリートに作用する内力および曲げモーメント

図-5に示した記号に従って、コンクリートの内力 N_c を求めると、一般的には次式で表わせる。

$$N_c = \int_0^x b_y \cdot \sigma_{cy} \cdot dy = \frac{x}{\epsilon_{cc}} \int_0^{\epsilon_{cc}} b_y \cdot f_1(\epsilon_{cy}) d\epsilon_{cy} \quad \text{---⑦}$$

次に、圧縮縁から N_c の作用位置までの距離を \bar{y} とすると、次式で求まる。

$$\bar{y} = x - \frac{\left(\frac{x}{\epsilon_{cc}}\right)^2 \int_0^{\epsilon_{cc}} b_y \cdot f_1(\epsilon_{cy}) \cdot \epsilon_{cy} \cdot d\epsilon_{cy}}{N_c} \quad \text{---⑧}$$

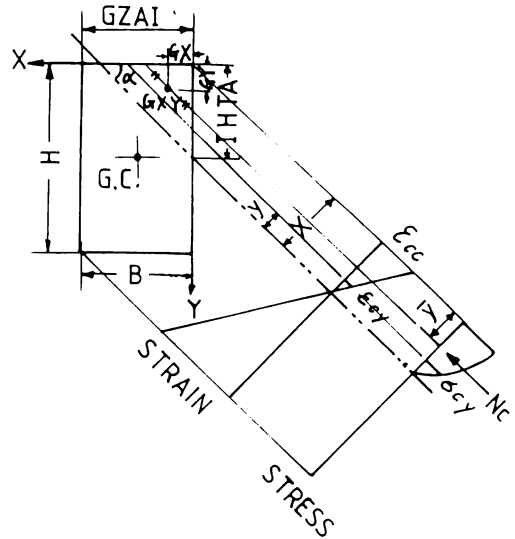


図-5 コンクリートの内力

また、コンクリート力 N_c の作用位置は中立軸に平行であり、図-5中の線分 $\bar{m}\bar{n}$ 上に分布して作用するとすると、その合力の作用位置GXYは x, \bar{y} ならびに α を使うことにより幾何学的に求まる。その重心位置を (GX, GY) とすると、図心におけるX軸およびY軸まわりの曲げモーメント M_{cx} および M_{cy} は次の様に与えられる。

$$M_{cx} = N_c \times \left(\frac{H}{2} - GY\right) \quad \text{---⑨}$$

$$M_{cy} = N_c * \left(\frac{B}{2} - GX \right) \quad \text{--- ⑩}$$

従って、XY 方向のコンクリートの曲げモーメント M_{cxy} は次のように求められる。

$$M_{cxy} = \sqrt{M_{cx}^2 + M_{cy}^2} \quad \text{--- ⑪}$$

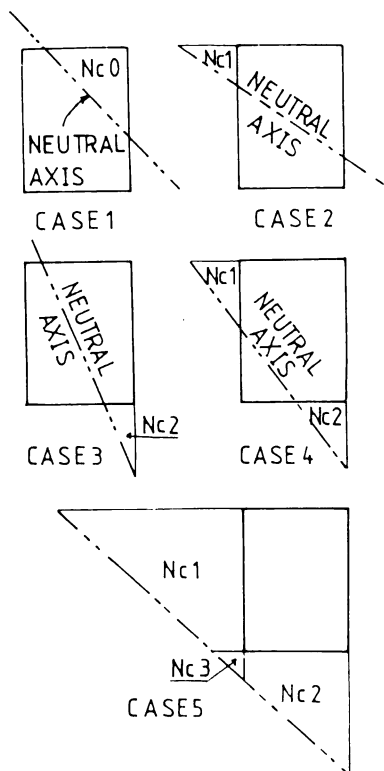


図-6 コンクリート内力の計算ケース

上記したコンクリートの内力ならびに曲げモーメントの求め方は中立軸が X 軸および Y 軸と切る切片 GZAI および IHTA がそれぞれ断面の幅 B および高さ H よりも小さい場合にのみ適用可能のものである。実際には、軸力の大きさと中立軸の角度 α によって、図-6 に示したように 5 ケースの計算組合せができることになる。従って、コンクリートの内力の計算において、各ケースに応じてコンクリートの内力を正確に求めねばならず、この点が実際に極めて複雑となり、軸力・二軸曲げの解析を難しくしている点でもある。例えば、CASE2 の場合についてコンクリート内力を求める手順を図-7 を参考にして、示してみると、

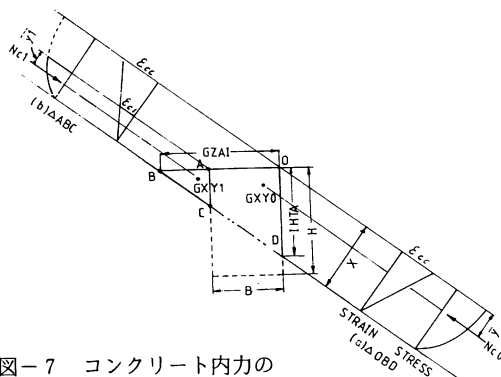


図-7 コンクリート内力の
計算ケースの一例

同図より明らかなようにコンクリートの内力 N_c は $\triangle OBD$ に作用するコンクリート内力 N_{c0} から $\triangle ABC$ に作用すると考えられるコンクリート合力 N_{c1} を差引けば求められる。従って、各三角形に作用する合力、作用位置ならびに曲げモーメントは基本的には⑦⑧⑨⑩式を使うことが可能となる。なお、この場合 $\triangle ABC$ の合力 N_{c1} を求めるに当っては A 点の歪 ϵ_{c1} が判っておく必要があるが、これについては A 点の座標が X-Y 座標系でみれば (B, 0) であるので、①式の考えを利用すると、次式のように求められる。

$$\epsilon_{c1} = \epsilon_{cc} \times \left(1 - \frac{B}{GZAI} - \frac{0}{IHTA} \right) \quad \text{--- ⑫}$$

従って、他のケースについても基本的にはそれぞれに応じて三角形に作用するコンクリートの内力の組合せから正しくコンクリートの内力 N_c を求めることができることになる。なお、曲げモーメントの求め方についても、内力同様にして⑨⑩⑪式を用いて求めることができる。

2. 4 解析手順

図-8 は軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材のフローチャートを示したものである。基本的には中立軸の角度 α 、外力による偏心量 e および任意のコンクリート歪 ϵ_{cc} に対して、まず中立軸 x を適当に仮定する。なおこの最初の x の設定については外力の偏心量 e の大きさによって適当に設定してやる必要がある。そこで、この ϵ_{cc} と x を仮定した上で鉄筋ならびにコンクリートの軸力および曲げモーメントを 2. 3 で述べた方法により計算し、内力による偏心量 e_2 を求めてやり、この値が設定した外力の偏心量 e にある精度で等しくなるまで、中立軸 x の

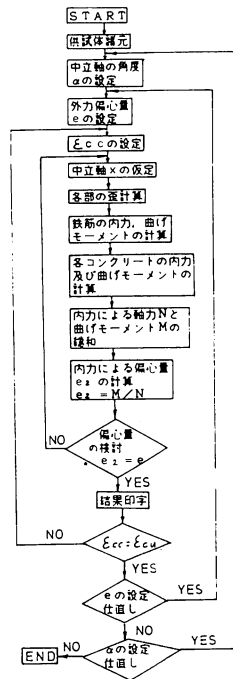


図-8 フローチャート

大きさを変えて計算し、等しくなればこれがこの場合の求める答えとなる。以下、同様にして ϵ_{cc} を変えた場合、外力の偏心量 e の設定仕直しならびに中立軸の角度 α の設定を仕直した場合について、上記の手順を同様に繰り返し計算すればよい。本解析で用いたマイコンはパナソード社の M343 であり、本研究で開発されたプログラムを一般に開放するために巻末に付録としてのせる。

2.5 記号の説明

文中ならびに図中に使用した記号の説明を以下に示す。

α : 中立軸が x 軸となす角度

ϵ_{cc} : コンクリートの最外縁の歪

ϵ_{si} : i 番目の鉄筋の歪

N_{si} : i 番目の鉄筋の内力

A_{si} : i 番目の鉄筋の断面積

E_{si} : i 番目の鉄筋の弾性係数

N_s : 鉄筋内力の総和

M_{sx} , M_{sy} , M_{sxy} : 鉄筋の図心における X 軸, Y 軸および XY 軸まわりの曲げモーメント

N_c : コンクリートの内力の総和

N_{c0} , N_{c1} , N_{c2} , N_{c3} : 図-6 中の各ケースに対応する内力

σ_{cy} : 中立軸から任意の距離 y におけるコンクリートの応力

b_y : 任意の距離 y におけるコンクリートの幅

ϵ_{cy} : 任意の距離 y におけるコンクリートのひずみ

\bar{y} : コンクリートの最外縁からコンクリート内力の作用位置までの距離

M_x , M_{cy} , M_{cxy} : コンクリートの図心における X 軸, Y 軸および XY 軸まわりの曲げモーメント

B , H : 鉄筋コンクリート断面の幅および高さ

$GZAI$, $IHTA$: 中立軸が X 軸および Y 軸とくる切片の長さ

e , e_2 : 外力および内力による偏心量

3. 解析結果

3.1 概説

2章で開発した軸力・二軸曲げの解析プログラムによって、本章では軸力・二軸曲げに及ぼす種々の要因（破壊曲面、鉄筋比、コンクリート強度、配筋方法）の下で、それぞれについて数値計算を行い、軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性を明らかにするものである。

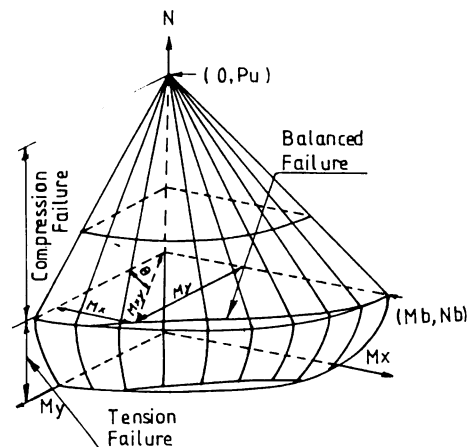


図-9 破壊曲面

3. 2 破壊曲面および釣合い破壊について

図-8は軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の破壊曲面の一例を概念的に示したものである。同図は縦軸に軸力、横軸に x 軸ならびに y 軸まわりの曲げモーメントをとり、三次元的に表現したものである。一般的には、軸力が零の場合の M_x-M_y 面上の曲線が二軸曲げ破壊曲線となり、 $N-M_x$ または $N-M_y$ 面上の曲線が軸力・一軸曲げ破壊曲線となり、この二軸曲げ破壊曲線と軸力・一軸曲げ破壊曲線の間にある無数の曲線群が軸力・二軸曲げ破壊曲面を構成することになる。この破壊曲面はつりあい破壊曲線を境にして圧縮破壊と引張破壊に分れることになる。軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の設計や解析において、上述したつりあい破壊曲面が極めて重要なものとなる訳で、緒言でも述べた様にこの曲線は軸力・一軸曲げ破壊曲線の回転曲線上にはおらず、 M_x と M_y の比率が1の場合に $M_x^2 + M_y^2 = M_{xy}^2$ を成立させる円よりも一般には小さくなり、この小さくなる低下割合は図中でも示しているように、つりあい軸力上で一番大きくなる。そこで、この低下割合について更に詳しく数値計算によって検討した一例が図-10である。図中、点線は $M_x^2 + M_y^2 = M_{xy}^2$ を成立させる破壊曲線を示しており、実線は本解析によって得られた破壊曲線である。同図より、明らかに M_x/M_y が1に近い程低下の割合が大きく M_x/M_y が0に近づくにつれて低下の割合が小さくなっていく。この

場合の最大の低下割合を調べてみると約15%程度であり、この値はFergusonによって指摘された値とほぼ同じ値となった。

3. 3 鉄筋比の影響

土木学会基準では鉄筋コンクリート柱の鉄筋比としては、0.8%~6%程度の鉄筋比になる様に規定されているので、鉄筋比の影響を検討する目安の鉄筋比としては、2, 4, 6%の鉄筋比を有する鉄筋コンクリート柱について数値計算を行った。図-11はこの計算結果の一例を示したものであって、同図には釣合い軸力時の M_x および M_y の相互作用図、軸力の作用していない場合の M_x および M_y の相互作用図および $M_x/M_y=1$ の場合の軸力・曲げの相互作用図をのせている。同図(a)より釣合い破壊時の M_x , M_y の相関は鉄筋比が大きくなるにつれて、曲げに対する抵抗も増え、さらに相互作用を円とした場合からの低下率は同様に鉄筋比が大きくなるにつれて大きくなる傾向が認められる。同図(b)では軸力が作用していない場合のもので釣合い破壊時の相互作用に比べると、かなり様相が異っており、鉄筋比の大きさによっては相互作用を円とした場合よりも大きくなる場合もあり、小さくなる場合もあることが見受けられる。同図(c)では鉄筋比の増大に伴い軸方向耐力も大きくなると同時に曲げ耐力も大きくなる傾向が明らかに認められる。また、鉄筋比によって釣合い軸力も変化しているのが現われている。

3. 4 コンクリート強度の影響

図-12はコンクリートの圧縮強度を200, 300, 400 kg/cm²の三種類に変化させた場合の数値計算結果を示したものである。同図(a)よりコンクリートの圧縮強度が大きくなるにつれて曲げ耐力も大きくなり、同時に釣合い破壊に達するときの軸力も大きくなる傾向が認められる。一方、軸力のない M_x , M_y の相互作用は同図(b)よりコンクリート強度によって若干の差があるもののほぼ同じであるとみられ、コンクリート強度が鉄筋コンクリート部材の軸力・二軸曲げに及ぼす大きな影響は同図(c)よりも明らかな様に圧縮破壊領域において著しく、軸方向耐力に大きな影響を及ぼしていることが認められる。なお、コンクリート圧縮強度に応じてコンクリートの破壊歪の影響についても検討してみたが、破壊歪による大きな相違はみられなかった。

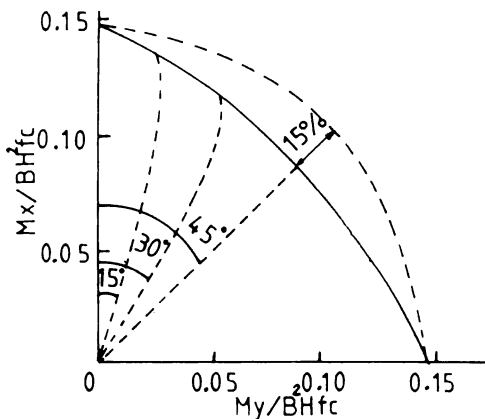
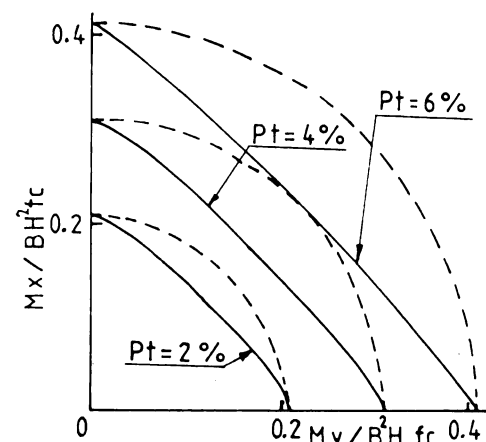
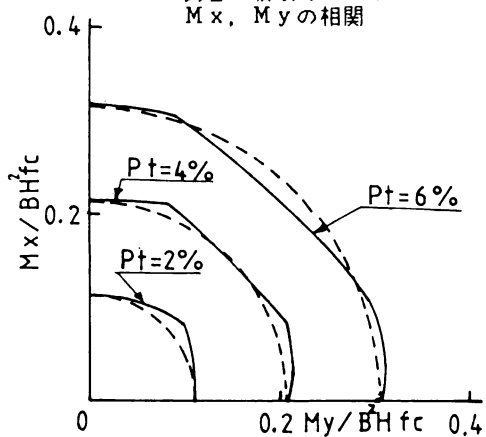


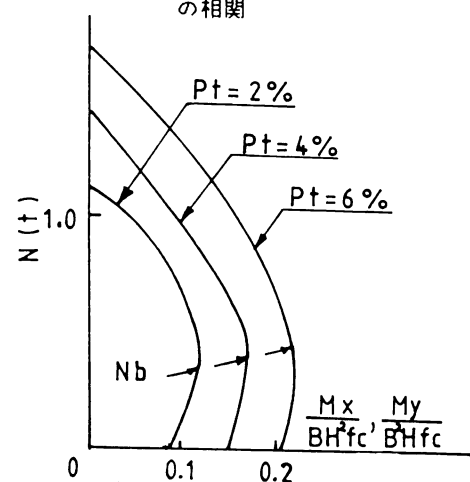
図-10 釣合い破壊時における M_x , M_y の相関



(a) 釣合い破壊時における M_x , M_y の相関

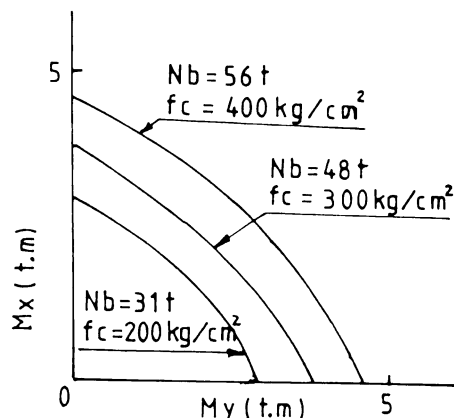


(b) 軸力零時の M_x , M_y の相関

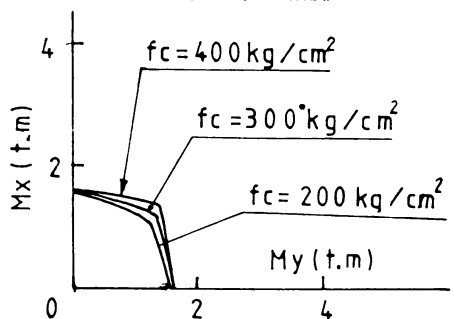


(c) 軸力、曲げの相関

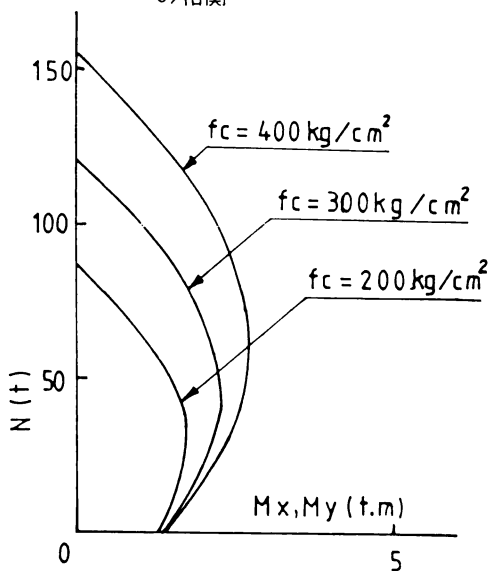
図-11 鉄筋比の影響



(a) 釣合い破壊時における M_x , M_y の相関



(b) 軸力零時の M_x , M_y の相関



(c) 軸力、曲げの相関

図-12 コンクリート強度の影響

3. 5 鉄筋の配筋の影響

鉄筋コンクリート構造物を設計する場合に、鉄筋量が同じ場合であっても、コンクリートの打込みや施工の関係から、鉄筋1本の大きさと本数の組合せに対して同一の鉄筋量であってもかなり多くの組合せが考えられる。本節ではこの問題を検討するために、図-13に示した様に、鉄筋の中心とかぶりコンクリートの間隔を一定にしておいて、総鉄筋量が同一になる様に鉄筋本数を4本、8本、12本、24本になる様に断面を与えた場合の軸力・二軸曲げの解析を行った。図-14は図中(a), (b), (c)いずれの場合も鉄筋本数を8本以上にしておけば釣合い破壊時の M_x , M_y 相互作用、軸力零時の M_x , M_y の相互作用ならびに軸力・曲げの相互作用ともに大して差がないことが知れる。なお、4本配筋断面に対して8本以上の配筋断面の方が軸耐力ならびに曲げ耐力が低下する理由としては、8本以上の鉄筋の配筋の場合にそれぞれの鉄筋を4等分して断面の四隅でしかも鉄筋の重心位置に移した場合を考えると、それぞれの重心位置は4本配筋の鉄筋の重心位置より断面中心側に移行するからであると考えられる。

3. 6 解析に用いた諸元について

本章の解析で用いた諸元をそれぞれの場合について表-1に一括して示す。

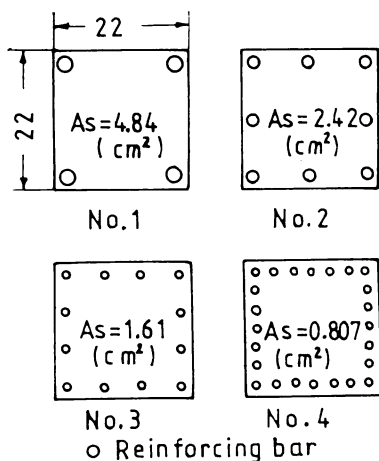


図-13 鉄筋の配置

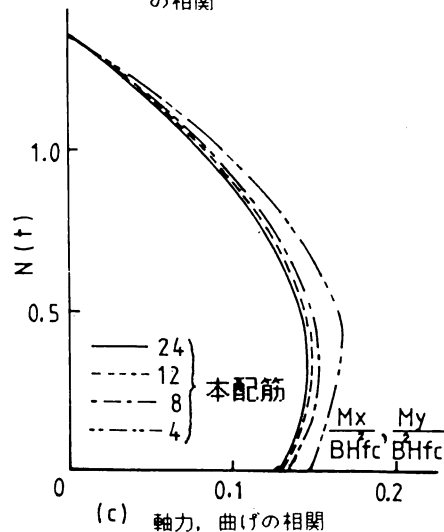
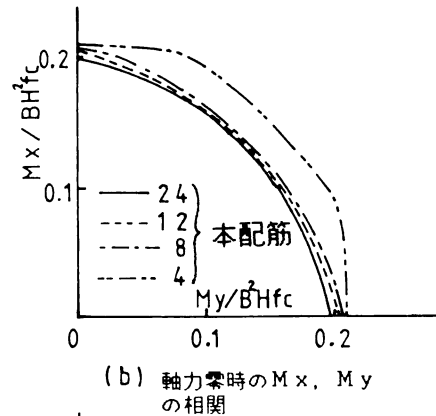
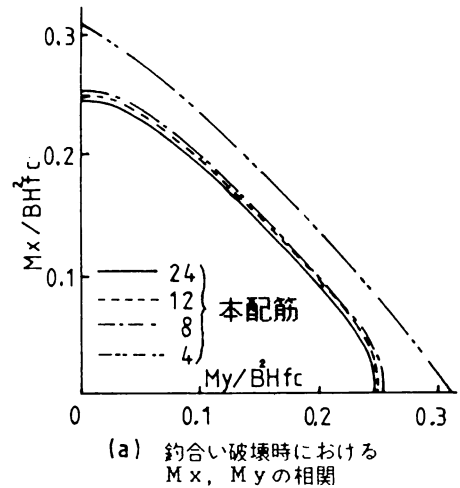


図-14 配筋の影響

表－１．解析に用いた諸元

図面番号	断面	鉄筋量	t_1	コンクリート			鉄筋	
				圧縮強度	ϵ_o	ϵ_u	降伏点応力度	弾性係数
図－10	20×20 ^{cm}	4×D13	3 ^{cm}	300 ^{kg/cm²}	0.002	0.0035	3780 ^{kg/cm²}	1.8×10 ⁶ ^{kg/cm²}
図－11	20×20	4×D13	3	300	0.002	0.0035	4410	2.1×10 ⁶
図－12	20×20	4×D13	3	200 300 400	0.002	0.0035	3780	1.8×10 ⁶
図－14	22×22	4×4.84 ^{cm²} 8×2.42 12×1.61 24×0.81	2	300	0.002	0.0035	3780	1.8×10 ⁶

4. 結 言

本研究では、まず軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の解析プログラムを弾塑性領域まで含めた場合の水平力の釣合いとモーメントの釣合いから求め、この解析プログラムによって鉄筋コンクリート部材のこの種の力学的特性を種々の要因の下で検討を行ったものである。本研究の解析の範囲で得られた結果を以下に示す。

(1) 釣合い破壊時の曲げ耐力 M_{xy} は M_x 、 M_y 面上の楕円と相似な形で表われ、 $M_x/M_y=1$ の場合で、しかも通常使用される鉄筋比の範囲では M_{xy} の相関を $M_x^2+M_y^2=M_{xy}^2$ の円とする場合に比べて、曲げ耐力は最大で約 15 %程度低下する。

(2) 軸力・二軸曲げに及ぼす鉄筋比の影響は極めて大きく、鉄筋比が大きければ、曲げ耐力ならびに軸耐力も鉄筋比に応じて大きくなるといえる。

(3) コンクリートの強度の影響は釣合い破壊軸力よりも小さい場合にはほぼ影響が認められないが、釣合い破壊軸力よりも大きい場合には顕著にその影響が現われ、特に軸耐力に及ぼす影響は著しい。

(4) 鉄筋の配筋の影響について検討した結果、一断面当り鉄筋を 8 本以上配置した場合には配筋の影響はほとんど認められず、実際問題として矩形断面を有する鉄筋コンクリート部材で鉄筋を 4 本配筋することは稀であるため、実用上は配筋の影響については考慮しなくても良いものと考えられる。

謝 辞

本研究は、本学科学学生山田昭浩君が昭和58年度に卒業論文として取上げたものの一部を加筆訂正して仕上げたものであり、計算結果の取りまとめには尽力して頂いた。ここに、厚く謝意を表します。また、本学技官前村政博氏には図面作製に多くの労力をさいて頂いた。文中にて謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法，共立出版，昭和53年
- 2) 小阪，森田：鉄筋コンクリート構造，丸善
- 3) 岡田清：鉄筋コンクリート工学，朝倉書店
- 4) 嶋津孝之：鉄筋コンクリート柱の二軸・曲げせん断耐力，コンクリート工学，Vol. 21
- 5) R. PARK, T. PAULAY : Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, 1974
- 6) P. M. Ferguson : Reinforced Concrete Fundamentals, A Wiley International Edition, Third Edition

付録

```

100 / ANALYSIS OF BI-AXIAL BENDING MOMENT AND AXIAL FORCE
110 On error goto 3510
120 Open "L.P:" for output as file 1
130 Dim AS(4), DISX(4), DISY(4), EPSS(4), EPSS1(4), NS(4), MYNS(4), MXNS(4)
140 /
150 Print #1, "*****"
160 Print #1, "***** ANALYSIS OF BI-AXIAL BENDING MOMENT AND AXIAL FORCE *****"
170 Print #1, "***** PROGRAM NAME ---- FA1:(RC)ZJIKAN ----"
180 Print #1, "***** PROGRAMMED BY S.MATSUMOTO *****"
190 Print #1, "*****"
200 Print #1, " "
210 Print #1, " "
220 / ***** INPUT DIMENSION *****
230 Read B, H, FC, K3
240 Print #1, "B=" ; B, "H=" ; H, "FC=" ; FC, "K3=" ; K3
250 Data 20, 20, 300, 0.85
260 /
270 Read EPS0, EPSU, EPSY, ES
280 Print #1, "EPS0=" ; EPS0, "EPSU=" ; EPSU, "EPSY=" ; EPSY, "ES=" ; ES
290 Data 0.002, 0.0038, 0.0021, 180000E1
300 /
310 For JJ = 1 to 4
320 Read AS(JJ)
330 Print #1, "AS(" ; JJ ; ")=" ; AS(JJ) ;
340 Next JJ
350 Data 1.267, 1.267, 1.267, 1.267
360 Print #1, " "
370 /
380 For J = 1 to 4
390 Read DISX(J)
400 Print #1, "DISX(" ; J ; ")=" ; DISX(J) ;
410 Next J
420 Data 3, 17, 3, 17
430 Print #1, " "
440 /
450 For J = 1 to 4
460 Read DISY(J)
470 Print #1, "DISY(" ; J ; ")=" ; DISY(J) ;
480 Next J
490 Data 3, 3, 17, 17
500 Print #1, " "
510 /
520 Print #1, " "
530 / ***** PREPARATION BEFORE CALCULATION *****
540 /
550 Input "EX=" ; EX, "EY=" ; EY
560 If EX = 0 then end
570 /
580 Let EXY = sqrt(EX^2+EY^2)
590 Let BETA = atn(EY/EX)
600 / Let ECCENO = EXY*sin(ALPHA+BETA)
610 Let ECCENO = 2
620 Let GAMMA = atn(H/B)
630 Let DIAG = sqrt(H^2+B^2)
640 /
650 Print #1, "EX=" ; EX, "EY=" ; EY, "EXY=" ; EXY
660 Print #1, " "
670 /
680 / ***** CAL. OF NEUTRAL AXIS *****
690 /
700 For I = 45 to 45 step 10
710 / ***** JUDGEMENT OF NEUTRAL AXIS *****
720 Let N = 1
730 If EXY <= H/6 then goto 682
740 If EXY <= H then goto 690
750 / ***** IN CASE OF EXY > H *****
760 Let X = H/2
770 Let X1 = H/2
780 Goto 710
790 / ***** IN CASE OF EXY <= H/6 *****
800 Let X = 5*H
810 Let X1 = 5*H
820 Goto 710
830 / ***** IN CASE OF H/6 < EXY < H *****
840 Let X = 2*H
850 Let X1 = 2*H
860 /
870 For HZM = 0.0038 to 0.0038 step 0.0001
880 /
890 / ***** INITIAL VALUES *****
900 /
910 Let EPSC = HZM
920 Let ALPHA = I*pi/180
930 /
940 /
950 Let GZAI = X/sin(ALPHA)
960 Let IHTA = GZAI*tan(ALPHA)

```

```

820 /**** AXIAL FORCE OF STEEL ****
830 /
840       Print "X=" ; X ;
850       For L = 1 to 4
860           Let EPSS(L) = EPSC*(1-(DISX(L)/GZAI)-(DISY(L)/IHTA))
870           Let EPSS1(L) = EPSS(L)
880           If EPSS1(L) < 0 then goto 900
890           If EPSS1(L) >= EPSY then
900               Let EPSS1(L) = EPSY
910           Goto 910
920           If abs(EPSS1(L)) >= EPSY then
930               Let EPSS1(L) = -EPSY
940           Let NS(L) = AS(L)*ES*EPSS1(L)
950       Next L
960 /
970 / **** MOMENT DUE TO STEEL *****
980 /
990       For II = 1 to 4
1000           Let MXNS(II) = NS(II)*(H/2-DISY(II))
1010           Let MYNS(II) = NS(II)*(B/2-DISX(II))
1020       Next II
1030       Let MXALNS = 0
1040       Let MYALNS = 0
1050       For L = 1 to 4
1060           Let MXALNS = MXALNS+MXNS(L)
1070           Let MYALNS = MYALNS+MYNS(L)
1080       Next L
1090 / Print #1, "ALPHA=" ; I, "EPSC=" ; EPSC, "X=" ; X, "GZAI=" ; GZAI, "IHTA=" ; IHTA
1100 / Print #1, "EPSS 1,2,3,4=" ; EPSS(1), EPSS(2), EPSS(3), EPSS(4)
1110 / Print #1, "NS 1,2,3,4=" ; NS(1), NS(2), NS(3), NS(4)
1120 / Print "MXALNS=" ; MXALNS, "MYALNS=" ; MYALNS
1130 /
1140 / **** AXIAL FORCE OF CONCRETE *****
1150 /
1160       Let NC = 0
1170       Let NC1 = 0
1180       Let NC2 = 0
1190       Let NC3 = 0
1200       Let NC4 = 0
1210 / **** (0) AXIAL FORCE NC0 *****
1220 /
1230       Let EPSX = EPSC
1240       Let XX = X
1250       Let TE11 = GZAI/cos(ALPHA)
1260       If EPSC > EPS0
1270           Gosub 3630
1280       If EPSC <= EPS0
1290           Gosub 3560
1300 /
1310       Let NC0 = NC
1320       Let NC = 0
1330 / **** (1) AXIAL FORCE NC1 *****
1340 /
1350       If GZAI-B > 0
1360           Goto 1320
1370       Let NC1 = 0
1380       Goto 1440
1390       Let EPSCX1 = EPSC*(1-B/GZAI)
1400       Let EPSX = EPSCX1
1410       Let XX = (GZAI-B)*sin(ALPHA)
1420       Let TE11 = (GZAI-B)/cos(ALPHA)
1430       If EPSCX1 > EPS0
1440           Gosub 3630
1450       If EPSCX1 <= EPS0
1460           Gosub 3560
1470 /
1480       Let NC1 = NC
1490       Let NC = 0
1500 / **** (2) AXIAL FORCE NC2 *****
1510 /
1520       If IHTA-H > 0
1530           Goto 1470
1540       Let NC2 = 0
1550       Goto 1560
1560       Let EPSCX2 = EPSC*(1-H/IHTA)
1570       Let EPSX = EPSCX2
1580       Let XX = (IHTA-H)*cos(ALPHA)
1590       Let TE11 = (IHTA-H)/sin(ALPHA)
1600       If EPSCX2 > EPS0
1610           Gosub 3630
1620       If EPSCX2 <= EPS0
1630           Gosub 3560
1640 /
1650       Let NC2 = NC
1660       Let NC = 0
1670 /

```

```

1560 / ***** (3) AXIAL FORCE NC3 *****
1570 /
1580 /           If X <= DIAG*sin(GAMMA+ALPHA) then goto 1680
1590 /
1600 /           Let EPSCX3 = EPSC*(1-B/GZAI-H/IHTA)
1610 /           Let EPSX = EPSCX3
1620 /           Let XX = ((GZAI-B)*tan(ALPHA)-H)*cos(ALPHA)
1630 /           Let TE11 = ((GZAI-B)*tan(ALPHA)-H)/sin(ALPHA)
1640 /           If EPSCX3 > EPS0 then
1650 /               Gosub 3630
1660 /               If EPSCX3 <= EPS0 then
1670 /                   Gosub 3560
1680 /                   Let NC3 = NC
1690 /                   Goto 1710
1700 /           Let NC3 = 0
1710 /           Let NC = 0
1720 / Print #1, "NC 0,1,2,3,4=" ; NC0, NC1, NC2, NC3, NC4
1730 /
1740 / ***** TOTAL OF AXIAL FORCE ; NS, NC
1750 /
1760 /           Let SUMNS = 0
1770 /           For L = 1 to 4
1780 /               Let SUMNS = SUMNS+NS(L)
1790 /           Next L
1800 /
1810 /           Let SUMNC = NC0-NC1-NC2+NC3
1820 /
1830 /           Let TOTALN = SUMNS+SUMNC
1840 /           If TOTALN <= 0 then goto 3180
1850 /           Print "SUMNS=" ; SUMNS, "SUMNC=" ; SUMNC, "TOTALN=" ; TOTALN
1860 /
1870 /
1880 / ***** CAL. OF ARM LENGTH OF CONCRETE FORCES *****
1890 /
1900 / ***** (0) ARM LENGTH OF NC0 *****
1910 /
1920 /           Let EPSXX = EPSC
1930 /           Let TAKASA = X
1940 /           Let TE1 = GZAI/cos(ALPHA)
1950 /           Let NC = NC0
1960 /           If EPSC <= EPS0
1970 /               Gosub 3700
1980 /           If EPSC > EPS0
1990 /               Gosub 3760
2000 /           Let ARM00 = ARM1
2010 /
2020 / ***** (1) ARM LENGTH DUE TO NC1 *****
2030 /
2040 /           If GZAI > B
2050 /               Goto 2050
2060 /           Let ARM11 = 0
2070 /           Goto 2130
2080 /           Let TAKASA = (GZAI-B)*sin(ALPHA)
2090 /           Let TE1 = (GZAI-B)/cos(ALPHA)
2100 /           Let NC = NC1
2110 /           Let EPSXX = EPSCX1
2120 /           If EPSCX1 <= EPS0
2130 /               Gosub 3700
2140 /           If EPSCX1 > EPS0
2150 /               Gosub 3760
2160 /           Let ARM11 = ARM1
2170 /
2180 / ***** (2) ARM LENGTH OF NC2 *****
2190 /
2200 /           If IHTA > H
2210 /               Goto 2180
2220 /           Let ARM22 = 0
2230 /           Goto 2240
2240 /           Let TAKASA = (IHTA-H)*sin(pi/2-ALPHA)
2250 /           Let TE1 = (IHTA-H)/cos(pi/2-ALPHA)
2260 /           Let NC = NC2
2270 /           If EPSCX2 <= EPS0
2280 /               Gosub 3700
2290 /           If EPSCX2 > EPS0
2300 /               Gosub 3760
2310 /           Let ARM22 = ARM1
2320 /
2330 / ***** (3) ARM LENGTH OF NC3 *****
2340 /
2350 /           If X <= DIAG*sin(GAMMA+ALPHA) then goto 2390
2360 /
2370 /           Let TAKASA = ((GZAI-B)*tan(ALPHA)-H)*cos(ALPHA)
2380 /           Let TE1 = ((GZAI-B)*tan(ALPHA)-H)/sin(ALPHA)
2390 /           Let NC = NC3
2400 /           Let EPSXX = EPSCX3
2410 /           If EPSCX3 <= EPS0 then

```

```

2350          Gosub 3700
          If EPSCX3 > EPS0 then
            Gosub 3760
            Let ARM33 = ARM1
            Goto 2410
2380 /
2390          Let ARM33 = 0
2400 /
2410 / Print #1, "ARM 00.11.22.33=" ; ARM00, ARM11, ARM22, ARM33
2420 /
2430 /
2440 / **** CENTER OF CONCRETE FORCES ****
2450 /
2460 / **** (0) CENTER OF CONCRETE FORCE, NC0
2470          Let GX0 = 0.5*(X-ARM00)*GZAI/X
2480          Let GY0 = 0.5*(X-ARM00)*tan(ALPHA)*GZAI/X
2490 /
2500 / **** (1) CENTER OF CONCRETE FORCE, NC1
2510          If GZAI > B
            Goto 2560
2520          Let GX1 = 0
2530          Let GY1 = 0
2540          Goto 2590
2550 /
2560          Let GX1 = 0.5*((GZAI-B)*sin(ALPHA)-ARM11)/sin(ALPHA)+B
2570          Let GY1 = 0.5*((GZAI-B)*sin(ALPHA)-ARM11)/cos(ALPHA)
2580 /
2590 / **** (2) CENTER OF CONCRETE FORCE, NC2
2600          If IHTA-H > 0
            Goto 2650
2610          Let GX2 = 0
2620          Let GY2 = 0
2630          Goto 2680
2640 /
2650          Let GX2 = 0.5*((IHTA-H)*cos(ALPHA)-ARM22)/sin(ALPHA)
2660          Let GY2 = 0.5*((IHTA-H)*cos(ALPHA)-ARM22)/cos(ALPHA)+H
2670 /
2680 / **** (3) CENTER OF CONCRETE FORCE, NC3
2690          If X <= DIAG*sin(GAMMA+ALPHA) then goto 2740
2700 /
2710          Let GX3 = 0.5*((GZAI-B)*tan(ALPHA)-H)*cos(ALPHA)-ARM33/sin(ALPHA)+B
2720          Let GY3 = 0.5*((GZAI-B)*tan(ALPHA)-H)*cos(ALPHA)-ARM33/cos(ALPHA)+H
2730          Goto 2760
2740          Let GX3 = 0
2750          Let GY3 = 0
2760 /
2770 / Print #1, "GX 0.1,2,3=" ; GX0, GX1, GX2, GX3
2780 / Print #1, "GY 0.1,2,3=" ; GY0, GY1, GY2, GY3
2790 /
2800 /CAL. OF NOMET DUE TO EACH CONCRETE FORCES
2810 /
2820          Let MXNC0 = (H/2-GY0)*NC0
2830          Let MYNC0 = (B/2-GX0)*NC0
2840 /
2850          Let MXNC1 = (H/2-GY1)*NC1
2860          Let MYNC1 = (B/2-GX1)*NC1
2870 /
2880          Let MXNC2 = (H/2-GY2)*NC2
2890          Let MYNC2 = (B/2-GX2)*NC2
2900 /
2910          Let MXNC3 = (H/2-GY3)*NC3
2920          Let MYNC3 = (B/2-GX3)*NC3
2930 /
2940          Print "MXNC 0.1,2,3=" ; MXNC0, MXNC1, MXNC2, MXNC3
2950          Print "MYNC 0.1,2,3=" ; MYNC0, MYNC1, MYNC2, MYNC3
2960 /
2970 / CAL. OF TOTAL MOMENT
2980          Let MXALL = MXALNS+MXNC0-MXNC1-MXNC2+MXNC3
2990          Let MYALL = MYALNS+MYNC0-MYNC1-MYNC2+MYNC3
3000          Let MMXXYY = MXALL*MXALL+MYALL*MYALL
3010          Let MXYALL = sqrt(MMXXYY)
3020 /
3030 / Print #1, "MXALL=" ; MXALL, "MYALL=" ; MYALL, "MXYALL=" ; MXYALL
3040 /
3050 / **** JUDGEMENT OF ECCENTRICITY ****
3060 /
3070          Let ECCEN = MXYALL/TOTALN
3080          Print "ECCEN=" ; ECCEN, "ECCENO=" ; ECCENO
3090 / Print #1, " "
3100 / Print #1, " "
3110          If abs(ECCENO-ECCEN)/ECCENO <= 0.001 then goto 3230
3120          If ECCEN > ECCENO then goto 3180
3130 / **** IN CASE OF ECCENO < ECCEN ****
3140          Let X = X-X1/(2*N)
3150          Let N = N+1
3160          Goto 780
3170 /

```

```

3180 / **** IN CASE OF ECCENO > ECCEN ****
3190     Let X = X+X1/(2^N)
3200     Let N = N+1
3210     Goto 780
3220 /
3230 / **** END OF CALCULATION AND OUTPUT OF RESILTS ****
3240 /
3250     Print #1, "ALPHA=" ; I, "EPSC=" ; EPSC, "X=" ; X
3253     Print #1, "EPSS 1,2,3,4=" ; EPSS(1), EPSS(2), EPSS(3), EPSS(4)
3256     Print #1, "NS 1,2,3,4=" ; NS(1), NS(2), NS(3), NS(4)
3259     Print #1, "MXALNS=" ; MXALNS, "MYALNS=" ; MYALNS
3260 /
3262     Print #1, "NC 0,1,2,3=" ; NC0, NC1, NC2, NC3
3265     Print #1, "SUMNS=" ; SUMNS, "SUMNC=" ; SUMNC, "TOTALN=" ; TOTALN
3268     Print #1, "MXNC 0,1,2,3=" ; MXNC0, MXNC1, MXNC2, MXNC3
3270 /
3271     Print #1, "MYNC 0,1,2,3=" ; MYNC0, MYNC1, MYNC2, MYNC3
3274     Print #1, "MXALL=" ; MXALL, "MYALL=" ; MYALL, "MXYALL=" ; MXYALL
3275 /
3277     Print #1, " "
3280     Print #1, " "
3360 /
3370 /
3380 / **** PREPARATION OF NEXT CALCULATION ****
3390     Let ARM00 = 0
3400     Let ARM11 = 0
3410     Let ARM22 = 0
3420     Let ARM33 = 0
3430     Let GX0 = 0
3440     Let GX1 = 0
3450     Let GX2 = 0
3460     Let GX3 = 0
3470     Let GY0 = 0
3480     Let GY1 = 0
3490     Let GY2 = 0
3500     Let GY3 = 0
3510 /
3520 /
3530 /
3540 /
3550 /
3560 / SUBROUTINE *** CAL. OF NC ; EPSX <= EPS0 ***
3570     Let NC = XX*K3*FC*TEI1*((EPSX/EPS0)/3-((EPSX/EPS0)^2)/12)
3580 / Print #1, "NC(1515)=" ; NC
3590     Return
3600     End
3610 /
3620 /
3630 / SUBROUTINE *** CAL. OF NC ; EPSX > EPS0 ***
3640     Let NC = XX*K3*FC*TEI1*(0.5-(EPS0/EPSX)/3+((EPS0/EPSX)^2)/12)
3650 / Print #1, "NC=" ; NC
3660     Return
3670     End
3680 /
3690 /
3700 / SUBROUTINE *** CAL. OF ARM LENGTH ; EPSXX <= EPS0 ***
3710     Let ARM1 = (TAKASA^2)*K3*FC*TEI1*((EPSXX/EPS0)/6-((EPSXX/EPS0)^2)/20)/NC
3720     Return
3730     End
3740 /
3750 /
3760 / SUBROUTINE *** CAL. OF ARM LENGTH ; EPSXX > EPS0 ***
3770     Let ARM1 = (TAKASA^2)*K3*FC*TEI1*(1/6-((EPS0/EPSXX)^2)/12+((EPS0/EPSXX)^3)/30)/NC
3780     Return
3790     End
3800 /
..

```