

4.43 — pręty, belki, układy prętowe

7.72 — plastyczność

Włodzimierz Sosnowski

**ASGRAM-3D — NUMERYCZNA ANALIZA
SPRĘŻYSTO-PLASTYCZNYCH
RAM PRZESTRZENNYCH**

5/1987

WARSZAWA 1987

<http://rcin.org.pl>

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 30 października 1986 r.



56840



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 190 egz. Ark.wyd. 1,9 Ark.druk. 2,75

Oddano do drukarni w lutym 1987 r.

Nr zamówienia 117/87

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

Włodzimierz Sosnowski
Zakład Teorii Konstrukcji

ASGRAM-3D - NUMERYCZNA ANALIZA SPRĘŻYSTO- -PLASTYCZNYCH RAM PRZESTRZENNYCH

Streszczenie

Celem pracy jest przedstawienie podstaw teoretycznych oraz opisu i instrukcji użytkowania programu ASGRAM-3D służącego do analizy sprężysto-plastycznych ram przestrzennych. Analiza ta ma charakter przyrostowy. Uwzględnienie nieliniowości materiałowych następuje poprzez użycie metody zmiennej sztywności nazywanej niekiedy metodą całkowania "w przód". Wykorzystujemy przy tym koncepcję tzw. uogólnionych przegubów plastycznych i stowarzyszone prawo plastycznego płynięcia Hubera-Misesa. Cały algorytm oparty jest na metodzie elementów skończonych.

Pracę zilustrowano przykładami obliczeń kilku różnych ram przestrzennych. Zamieszczono wydruki danych i wyników dla jednego z przykładów, a także wydruk podprogramu generującego macierze sprężysto-plastycznej sztywności elementu ramy przestrzennej.

1. Wstęp

W pracy przedstawiono krótki, liczący około 1400 wierszy w FORTRANIE i łatwy do implementacji na różnych spotykanych w kraju komputerach, program numeryczny ASGRAM-3D. Program służy do przyrostowej analizy sprężysto-plastycznej ram przestrzennych metodą elementów skończonych. Jest on zainstalowany na komputerze osobistym Olivetti M-24, kompatybilnym z komputerem IBM-PC oraz na minikomputerze SM-4. Algorytm zastosowany w programie istotnie rozszerza możliwości programów ASGRAM i ASGRAMW, prezentowanych wcześniej w pracach [1] oraz [2].

ASGRAM-3D jest według rozeznania autora pierwszym tego typu programem opracowanym w Polsce. Podczas jego pisania wykorzystano wiele modułów zawartych w dostępnej w kraju książce [3].

Zgodnie z jedną z ogólnie przyjętych metod przybliżonych obliczeń płyt usztywnionych, polegającą na wykorzystaniu koncepcji tzw. szerokości efektywnych, program może też stanowić użyteczne narzędzie do analizy konstrukcji spotykanych na przykład w okrętownictwie. Dokładniejszy opis takiego zastosowania liniowej wersji programu zamieszczono w pracy [4].

2. Algorytm postępowania

Sprężysto-plastyczne zachowanie się konstrukcji w zakresie małych przemieszczeń opisuje równanie

$$(1) \quad \underline{\underline{K}}^{(s-p)} \underline{\underline{\Delta T}} = \underline{\underline{\Delta P}},$$

w którym $\underline{\underline{K}}^{(s-p)}$ jest macierzą sztywności sprężysto-plastycznej całej ramy, $\underline{\underline{\Delta P}}$ oznacza przyrost wektora obciążenia zaś $\underline{\underline{\Delta T}}$ jest poszukiwanym wektorem przyrostów przemieszczeń węzłowych.

Równanie to rozwiązujemy metodą całkowania "w przód", o tradycyjnej nazwie metody zmiennej sztywności, która została przedstawiona w pracy [2], str.50. Globalna macierz sprężysto-plastyczna ramy jest modyfikowana na każdym przyroście obciążenia poprzez zastąpienie macierzy sprężystych uplastycznionych elementów odpowiednimi macierzami sprężysto-plastycznymi.

W przeciwieństwie do analizy stanu granicznego uzyskujemy pełną informację o kolejnych etapach procesu deformacji, prowadzącego po przekroczeniu fazy czyste sprężystej poprzez fazy sprężysto-plastyczne aż do zniszczenia konstrukcji. Zakładamy, że deformacje plastyczne koncentrują się w przekrojach przywęzłowych. Uplastycznienie przekrojów następuje w chwili spełnienia warunku stanu granicznego. Tworzą się tzw. uogólnione przeguby plastyczne. Ich powstanie uwarunkowane jest spełnieniem równań typu

$$(2) \quad \underline{F}(\underline{Q}) = 0, \quad ,$$

w którym \underline{Q} oznacza wektor uogólnionych sił wewnętrznych w rozpatrywanym przekroju przywęzłowym elementu skończonego.

Siłami wewnętrznymi występującymi jako argumenty w warunku stanu granicznego (2) są: momenty zginające M_y i M_z , moment skręcający M_x , siły tnące Q_y i Q_z oraz siła osiowa Q_x . Dla belki o dwu końcach, $k = 1, 2$ (rys.1) mamy

$$(3) \quad \underline{Q}^k = \{ Q_x^k, Q_y^k, Q_z^k, M_x^k, M_y^k, M_z^k \}.$$

Siłom tym odpowiadają następujące węzłowe stopnie swobody:

$$(4) \quad \underline{r}^k = \{ r_x^k, r_y^k, r_z^k, \theta_x^k, \theta_y^k, \theta_z^k \}.$$

W zakresie sprężystym powyższe wielkości wiążę znana zależność:

$$(5) \quad \underline{Q} = \underline{k}^{(s)} \underline{r}$$

w której $\underline{k}^{(s)}$ oznacza sprężystą macierz sztywności elementu, obciążonego jak na rys. 1. Jawną postać tej macierzy podajemy w tabelicy 1.

Spełnienie warunku (2) oznacza pojawienie się uaktywnionej strefy plastycznej. Odkształcenia całkowite $\underline{\epsilon}^c$ konstrukcji można uważać za sumę odkształceń sprężystych $\underline{\epsilon}^s$ i odkształceń plastycznych $\underline{\epsilon}^p$:

$$(6) \quad \underline{\epsilon}^c = \underline{\epsilon}^s + \underline{\epsilon}^p$$

W przypadku belki Timoshenki zakładamy, że płaski przekrój, prostopadły do osi belki pozostaje po odkształceniu płaski, lecz niekoniecznie prostopadły do tej osi. Przemieszczenie dowolnych dwu punktów A i B takiego przekroju na

płaszczyźnie pokazuje rysunek 2.

Rozpatrzmy dla prostoty przypadek ramy płaskiej.

Jeśli przemieszczenia punktu A oznaczymy przez r_x i r_z , zaś obrót przekroju - θ_y , to przemieszczenia punktu B wyniosą:

$$(7) \quad \begin{aligned} u_x &= r_x + \theta_y z, \\ u_z &= r_z, \\ u_y &= 0. \end{aligned}$$

Drugie z powyższych równań (7) wynika z przyjęcia hipotezy małych obrotów. Hipoteza ta jest słuszna również w przypadku utworzenia się przegubu plastycznego pod warunkiem, że stopień statycznej niewyznaczalności konstrukcji jest "duży", co oznacza, że konstrukcja jako całość charakteryzuje się znacznym wzmocnieniem. Uogólnienie hipotezy małych obrotów na zakres sprężysto-plastyczny wymaga więc założenia, że tangens nachylenia krzywej opisującej zależność przemieszczeń od obciążenia, E_t dla całej konstrukcji spełnia warunek

$$(8) \quad E_s > E_t > a.$$

Większy od zera parametr a jest miarą słuszności hipotezy małych obrotów oraz charakteryzuje stopień jednoznaczności rozwiązania sprężysto-plastycznego /które jak wiadomo staje się niejednoznaczne gdy $E_t \rightarrow 0$ /. E_s oznacza tu moduł Younga.

Odształcenia belki Timoshenki wyraża się wzorami:

$$(9) \quad \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{du_x}{dx} = \frac{dr_x}{dx} + \frac{d\theta_y}{dx} z, \\ \gamma_{xz} &= \frac{du_x}{dz} + \frac{du_z}{dx} = \theta_y + \frac{dr_z}{dx}, \\ \epsilon_y &= \epsilon_z = \gamma_{xy} = \gamma_{zy} = 0 \end{aligned}$$

Siły uogólnione są równe

$$(10) \quad Q_x = \int_S \sigma_x dS,$$

$$Q_y = \int_S \tau_{xz} dS,$$

$$M_z = \int_S \sigma_x z dS.$$

Zasada prac wirtualnych pozwala stowarzyszyć z powyższymi siłami uogólnionymi następujące odkształcenia uogólnione:

$$(11) \quad \begin{aligned} \delta &= \frac{dT_x}{dx} && \text{- odkształcenie osiowe,} \\ \beta &= \theta_y + \frac{dT_z}{dx} && \text{- średni kąt odkształcenia} \\ &&& \text{postaciowego,} \\ \mathcal{H} &= \frac{d\theta_y}{dx} && \text{- krzywizna.} \end{aligned}$$

Widzimy, że przy przyjętym założeniu o małości obrotów istnieje prawie jednoznaczna zależność pomiędzy odkształceniami i przemieszczeniami i możemy z dokładnością do niewielkich sztywnych przemieszczeń napisać związek:

$$(12) \quad \Delta \underline{T}^C = \Delta \underline{T}^S + \Delta \underline{T}^P$$

Aby lepiej uzasadnić słuszność zasady addytywności przyrostów części sprężystej $\Delta \underline{T}^S$ i plastycznej $\Delta \underline{T}^P$ wektora całkowitych przyrostów przemieszczeń $\Delta \underline{T}^C$ w węzłach belki Timoshenki, niektórzy autorzy, na przykład w pracy (3) /i w wielu innych/ zakładają, że odkształcenia plastyczne wynikają jedynie ze zginania. Podobne związki obowiązują dla ram przestrzennych.

Powyższe rozumowanie zachowuje ważność dla prostszego modelu belek - Bernoulli'ego-Eulera. W modelu tym przyjmuje się, że płaskie przekroje, prostopadłe do osi belki, pozostają płaskie i prostopadłe do tej osi po odkształceniu. Szczegółowy opis różniczkowy belki zawierający dokładne omówienie zależności pomiędzy odkształceniami i przemieszczeniami dla różnych modeli obliczeniowych można znaleźć w książce [5] w rozdziale 3. W pracy stosujemy model belek Bernoulli'ego.

Plastyczną część przyrostu przemieszczeń możemy więc, wobec poczynionych powyżej założeń, policzyć wykorzystując

stowarzyszone prawo plastycznego płynięcia, ze wzoru:

$$(13) \quad \Delta \underline{T}^P = \begin{Bmatrix} \Delta T_1^P \\ \Delta T_2^P \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \left(\frac{\partial F}{\partial Q} \right)_1 \\ \left(\frac{\partial F}{\partial Q} \right)_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{\Phi}_1 \\ \underline{\Phi}_2 \end{Bmatrix}$$

Gdy przekrój przywęzłowy 1 lub 2 elementu jest sprężysty, zachodzi odpowiednio $M_1 = 0$ lub $M_2 = 0$. Zależność pomiędzy przyrostem sił wewnętrznych i przyrostami przemieszczeń można wyrazić następująco:

$$(14) \quad \Delta \underline{Q} = \begin{Bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{k}_{11} & \underline{k}_{12} \\ \underline{k}_{21} & \underline{k}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta T_1^S \\ \Delta T_2^S \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{k}_{11} & \underline{k}_{12} \\ \underline{k}_{21} & \underline{k}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta T_1 - \Delta T_1^P \\ \Delta T_2 - \Delta T_2^P \end{Bmatrix}$$

Podstawiając równanie (13) do równania (14) otrzymamy wzór:

$$(15) \quad \Delta \underline{Q} = \begin{bmatrix} \underline{k}_{11} & \underline{k}_{12} \\ \underline{k}_{21} & \underline{k}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta T_1 - M_1 \underline{\Phi}_1 \\ \Delta T_2 - M_2 \underline{\Phi}_2 \end{Bmatrix}$$

Dowolna zmiana sił wewnętrznych działających w przekroju przywęzłowym nie można naruszyć warunku plastyczności. Zachodzi więc związek:

$$(16) \quad \underline{0} = \Delta \underline{F} = \begin{Bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \left(\frac{\partial F}{\partial Q} \right)_1 \Delta Q_1 \\ \left(\frac{\partial F}{\partial Q} \right)_2 \Delta Q_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\Phi}_1^T & 0 \\ 0 & \underline{\Phi}_2^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \end{Bmatrix}$$

Równania (15) i (16) określają zależność pomiędzy M_k i ΔT^P . Rozpatrzmy przypadek, gdy przekrój 1 jest uplastyczniony, zaś przekrój 2 jest sprężysty. Zachodzi wówczas

$$M_1 \neq 0, \quad M_2 = 0.$$

Wstawmy powyższe wartości do równania (15). Przybierze ono wówczas postać

$$(17) \quad \Delta \underline{Q} = \begin{bmatrix} \underline{k}_{11} & \underline{k}_{12} \\ \underline{k}_{21} & \underline{k}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta T_1 - M_1 \underline{\Phi}_1 \\ \Delta T_2 \end{Bmatrix}$$

Otrzymaną wielkość możemy podstawić do równania (16)

$$(18) \quad \begin{bmatrix} \underline{\phi}_1^T & 0 \\ 0 & \underline{\phi}_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{k}_{11} & \underline{k}_{12} \\ \underline{k}_{21} & \underline{k}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \underline{T}_1 - M_1 \underline{\phi}_1 \\ \Delta \underline{T}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Po wymnożeniu i uporządkowaniu składników otrzymamy układ równań:

$$(19) \quad \begin{bmatrix} \underline{\phi}_1^T \underline{k}_{11} & \underline{\phi}_1^T \underline{k}_{12} \\ \underline{\phi}_2^T \underline{k}_{21} & \underline{\phi}_2^T \underline{k}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \underline{T}_1 \\ \Delta \underline{T}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \underline{\phi}_1^T \underline{k}_{11} M_1 \underline{\phi}_1 \\ \underline{\phi}_2^T \underline{k}_{21} M_2 \underline{\phi}_2 \end{Bmatrix}$$

Pierwsze z nich wygląda następująco

$$(20) \quad \underline{\phi}_1^T \begin{bmatrix} \underline{k}_{11} & \underline{k}_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \underline{T}_1 \\ \Delta \underline{T}_2 \end{Bmatrix} = \underline{\phi}_1^T \underline{k}_{11} M_1 \underline{\phi}_1$$

stąd

$$(21) \quad M_1 = \frac{\underline{\phi}_1^T \begin{bmatrix} \underline{k}_{11} & \underline{k}_{12} \end{bmatrix}}{\underline{\phi}_1^T \underline{k}_{11} \underline{\phi}_1} \begin{Bmatrix} \Delta \underline{T}_1 \\ \Delta \underline{T}_2 \end{Bmatrix}$$

Wstawiając tę wartość M_1 do równania (17) otrzymamy sprężysto-plastyczną macierz sztywności elementu belkowego dla uplastycznego przekroju 1 i sprężystego przekroju 2:

$$(22) \quad \Delta \underline{Q} = \begin{bmatrix} \underline{k}_{11} & \underline{k}_{12} \\ \underline{k}_{21} & \underline{k}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \underline{T}_1 - \frac{\underline{\phi}_1^T \begin{bmatrix} \underline{k}_{11} & \underline{k}_{12} \end{bmatrix}}{C_A} \begin{Bmatrix} \Delta \underline{T}_1 \\ \Delta \underline{T}_2 \end{Bmatrix} \underline{\phi}_1 \\ \Delta \underline{T}_2 \end{Bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \underline{k}_{11} - \frac{\underline{k}_{11} \underline{\phi}_1 \underline{\phi}_1^T \underline{k}_{11}}{C_A} & \underline{k}_{12} - \frac{\underline{k}_{11} \underline{\phi}_1 \underline{\phi}_1^T \underline{k}_{12}}{C_A} \\ \underline{k}_{21} - \frac{\underline{k}_{21} \underline{\phi}_1 \underline{\phi}_1^T \underline{k}_{11}}{C_A} & \underline{k}_{22} - \frac{\underline{k}_{21} \underline{\phi}_1 \underline{\phi}_1^T \underline{k}_{12}}{C_A} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \underline{T}_1 \\ \Delta \underline{T}_2 \end{Bmatrix} =$$

gdzie

$$C_A = \underline{\phi}_1^T \underline{k}_{11} \underline{\phi}_1$$

$$= \underline{k}^P \Delta \underline{T}$$

Podobnie możemy obliczyć sprężysto-plastyczne macierze sztywności dla pozostałych dwu przypadków uplastycznień belki - gdy przekrój 1 jest sprężysty, przekrój 2 zaś jest uplastyczniony oraz gdy obydwa przekroje przywęzłowe są uplastycznione. Wzory potrzebne do wyznaczenia współczynników tych macierzy można znaleźć w pracy [2], str. 56-60.

W Załączniku nr 1 zamieściliśmy kompletny wydruk podprogramu MP służącego do generacji tych macierzy dla wszystkich trzech wyróżnionych przypadków uplastycznień elementu belkowego ramy przestrzennej.

Równanie (2) opisuje powierzchnię graniczną, która odziela w przestrzeni przekrojowych sił wewnętrznych stany zachowań sprężystych przekroju od stanów pełnego uplastycznienia. Nie wyróżniamy więc w tym podejściu tzw. początkowej powierzchni granicznej opisującej stany początkowych uplastycznień przekroju. Spośród wielu spotykanych postaci równania (2) wybierzemy następujący, najprostszy warunek stanu granicznego w k-tym przekroju przywęzłowym ramy

$$(23) \quad q_x^2 + q_y^2 + q_z^2 + m_x^2 + m_y^2 + m_z^2 - 1 = 0,$$

stosowany dla pełnych przekrojów prostokątnych belek. W przypadku belek cienkościennych powierzchnia opisująca stan graniczny nie spełnia zazwyczaj warunków symetrii względem osi głównych przekroju. W powyższym wzorze poszczególne składniki są siłami bezwymiarowymi:

$$(24) \quad q_x = \frac{Q_x}{Q_{xgr}}, \quad q_y = \frac{Q_y}{Q_{ygr}}, \quad q_z = \frac{Q_z}{Q_{zgr}},$$
$$m_x = \frac{M_x}{M_{xgr}}, \quad m_y = \frac{M_y}{M_{ygr}}, \quad m_z = \frac{M_z}{M_{zgr}}$$

Znakiem g_r oznaczamy wielkości graniczne odpowiednio siły podłużnej Q_x , sił tnących Q_y i Q_z oraz momentów M_x , M_y i M_z ; x , y i z odpowiadają osiom lokalnego układu współrzędnych rozpatrywanego elementu ramy.

Należy podkreślić, że w programie nie rozwiązano zagadnienia "odchodzenia" od rozwiązania dokładnego oraz wychodzenia poza powierzchnię plastyczności w przestrzeni uogólnionych sił wewnętrznych. Dlatego zaleca się stosowanie dostatecznie małych przyrostów obciążenia, nie przekraczających np. 0.01 części obciążenia wywołującego utworzenie się pierwszego przegubu plastycznego. O obydwu w/w zjawiskach pisaliśmy dokładnie w pracy [2], str. 52-53.

3. Opis programu numerycznego.

Program ułożono wykorzystując niektóre segmenty programów opisanych w pracy [3], str. 237, oraz programu ASGRAM [2]. Schemat blokowy programu przedstawiono na następnej stronie.

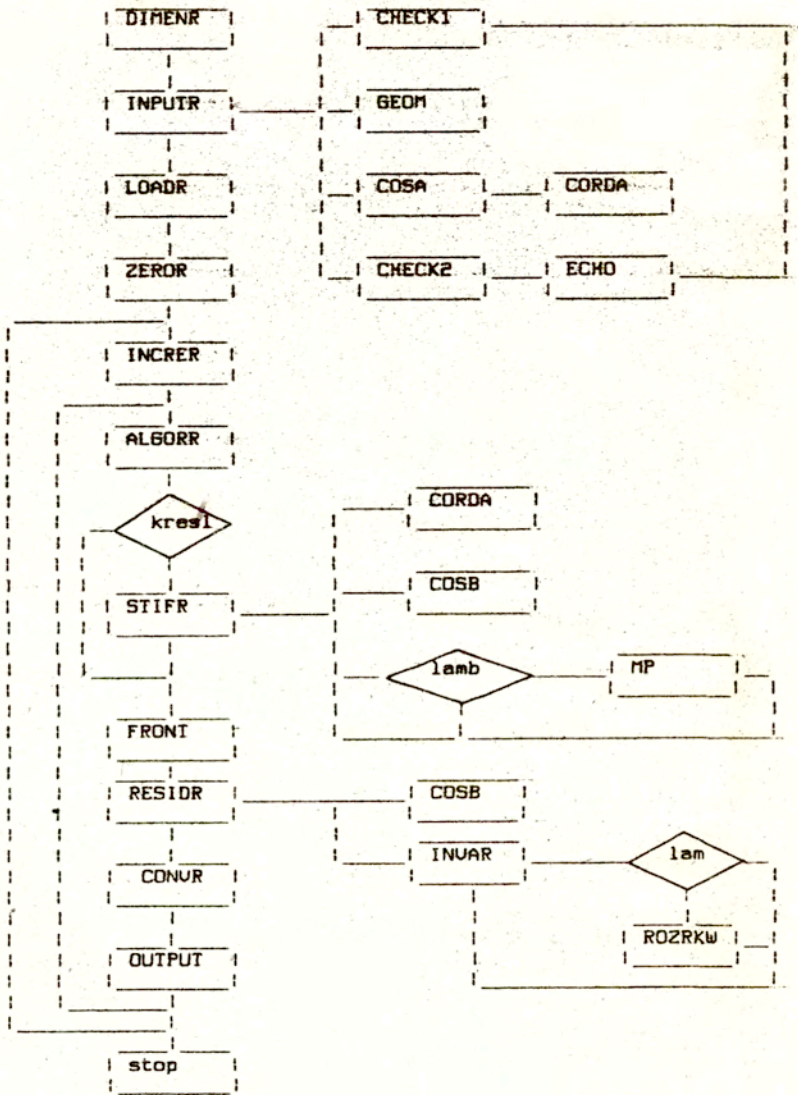
3.1. Program główny

Całością obliczeń steruje program główny, który wywołuje w odpowiedniej kolejności wszystkie podprogramy oraz realizuje procedurę przyrostową. Program ten korzysta z siedmiu zbiorów zewnętrznych: zbioru nr 5 z danymi, zbioru nr 6 z wynikami oraz zbiorów o numerach 1, 2, 3, 4 i 8, na których zapisywane są wyniki pośrednie.

3.2. Podprogram DIMENR

Podprogram DIMENR służy do zdefiniowania wielkości związanych z dynamiczną rezerwacją pamięci. Dzięki niemu zmiana maksymalnych rozmiarów problemu, który może być rozwiązany przy pomocy tego programu na komputerze o danej pamięci wymaga jedynie zmienienia parametrów zadawanych w podprogramie DIMENR i w programie głównym.

ASGRAM-3D - sprężysto-plastyczna analiza ram przestrzennych



3.3. Podprogram INPUTR

Większość danych czytana jest w podprogramie INPUTR. Dane te, jak zwykle w metodzie elementów skończonych składają się z trzech podzbiorów. Pierwszy podzbiór obejmuje wielkości definiujące geometrię konstrukcji oraz warunki brzegowe. W drugim podzbiorze definiujemy własności materiałów. Trzeci podzbiór zawiera informację o obciążeniach.

W zamyśle autorów podprogram opisany w pracy [3] może być wykorzystany w wielu różnych programach i dlatego na początku niezbędne jest podanie danych kontrolnych charakteryzujących rodzaj konstrukcji, sposób dyskretyzacji, liczbę różnych materiałów itp. Znaczenie kolejnych parametrów karty kontrolnej podano w instrukcji przygotowania danych w rozdziale 5.

Geometria konstrukcji jest określona jednoznacznie przez podanie współrzędnych punktów węzłowych oraz topologii czyli sposobu połączeń elementów. Współrzędne węzłów podajemy w globalnym układzie współrzędnych. Aby zlokalizować węzeł, trzeba w naszym przypadku podać trzy współrzędne. Są one przechowywane w tablicy

COORD (IPOIN, IDIME)

w której IPOIN odpowiada numerowi węzła, zaś IDIME odnosi się do danej składowej o numerze 1 /dla osi x/, 2 /dla osi y/ lub 3 /dla osi z/.

Aby wyspecyfikować warunki podparcia, wprowadzamy tablicę

NOFIX (IVFIX)

wskazującą, że IVFIX-ty węzeł brzegowy ma numer NOFIX (IVFIX). Parametr IFPRE (IDF) wskazuje, który ze stopni swobody IDF w tym węźle przyjmuje zadaną wartość przemieszczenia. W naszym przypadku IFPRE (IDF) może przybierać wartość 0, oznaczającą ruch swobodny, lub wartość 1, oznaczającą ograniczenie kinematyczne. Zadane wartości przemieszczeń przechowywane są w tablicy PRESC (IVFIX, IDOFN), przy czym IVFIX oznacza

numer węzła, zaś IDOFN - odpowiedni stopień swobody w tym węźle.

Program wymaga wyspecyfikowania następujących własności materiałowych:

PROPS (NUMAT, 1) - E_s - moduł sprężystości,

PROPS (NUMAT, 2) - ν - współczynnik Poissona,

PROPS (NUMAT, 3) - Q_{xgr} - siła osiowa wywołująca uplastycznienie przy czystym ściskaniu,

PROPS (NUMAT, 4) - I_x - biegunowy moment bezwładności przekroju belki względem osi x lokalnego układu współrzędnych,

PROPS (NUMAT, 5) - M_{xgr} - moment skręcający działający względem osi x, wywołujący uplastycznienie przy czystym skręcaniu /tylko tym momentem/,

PROPS (NUMAT, 6) - M_{ygr} - moment zginający działający względem osi z, wywołujący uplastycznienie przy czystym zginaniu /tylko tym momentem/,

PROPS (NUMAT, 7) - I_z - moment bezwładności przekroju belki względem osi z lokalnego układu współrzędnych,

PROPS (NUMAT, 8) - A - pole przekroju poprzecznego belki,

PROPS (NUMAT, 9) - I_y - moment bezwładności przekroju belki względem osi y lokalnego układu współrzędnych,

PROPS (NUMAT, 10) - SIG - granica plastyczności.

W przypadku najczęściej spotykanych przekrojów dwuteowych można wykorzystać podprogram GEOMP wyliczający automatycznie charakterystyki geometryczne tego przekroju.

3.4. Podprogram GEOMP

Podprogram może być wywołany poprzez wyspecyfikowanie w karcie kontrolnej parametru NCRIT=4. Wykorzystujemy wówczas tablicę PROPS specyfikując w niej, zamiast wartości opisanych w p. 3.3, następujące parametry:

PROPS (NUMAT, 1) - E - moduł Younga E_s ,
PROPS (NUMAT, 2) - NI - współczynnik Poissona ,
PROPS (NUMAT, 3) - TW - grubość środnika ,
PROPS (NUMAT, 4) - SIG - granica plastyczności ,
PROPS (NUMAT, 5) - TSF - grubość mniejszej półki ,
PROPS (INUMAT, 6) - TBF - grubość większej półki ,
PROPS (NUMAT, 7) - HW - wysokość srodnika ,
PROPS (NUMAT, 8) - BBF - szerokość większej półki ,
PROPS (NUMAT, 9) - BSF - szerokość mniejszej półki .

Wszystkie wskaźniki charakteryzujące geometrię przekroju, jak również graniczne siły przekrojowe są wyliczone automatycznie przez podprogram.

3.5. Podprogramy diagnostyczne CHECK 1, CHECK 2 i ECHO

Podprogramy sygnalizują błędy w danych podając rodzaj błędu i wskazując dokładnie miejsce ich wystąpienia.

3.6. Podprogramy COSA, CORDA i COSB

Wyliczają sinusy i cosinusy kierunkowe elementu, jego długość a następnie macierz transformacji macierzy sztywności elementu z układu lokalnego do globalnego układu współrzędnych wg wzorów podanych w pracy [4], str. 21-23.

3.7. Podprogram LOADR

Funkcja tego programu sprowadza się do wczytania obciążeń elementów zgodnie z instrukcją wprowadzania danych zamieszczoną w rozdziale 5.

3.8. Podprogram ZEROR

Podprogram zeruje zawartość tablic służących do przechowywania i sumowania wielkości przyrostowych związanych z procedurą przyrostową.

3.9. Podprogram INCRER

Podprogram ten wylicze przyrosty obciążeń lub zadanych przemieszczeń na podstawie mnożników obciążeń wyspecyfikowanych zgodnie z instrukcją wprowadzania danych. Poniżej wyjaśnimy znaczenie zmiennych i parametrów związanych z tym podprogramem:

- FACTO - parametr decydujący o wielkości przyrostu obciążenia, którego początkową wartość wprowadziliśmy w podprogramie LOADR, w tablicy RLOAD (IELEM, IEVAB). Przyrost obciążenia ΔP jest wyliczany wg wzoru $\Delta P = RLOAD (IELEM, IEVAB) * FACTO$. Obciążenie całkowite obliczane jest jako suma przyrostów. Oznacza to, że jeśli np. podaliśmy dla pierwszych trzech przyrostów obciążenia kolejne wartości FACTO równe 0.8, 0.2 i 0.1, to całkowite obciążenie po trzech przyrostach wyniesie 1.1 obciążenia wyspecyfikowanego jako początkowe w podprogramie LOADR. Oznacza to możliwość stosowania różnych, dowolnych przyrostów obciążenia.
- TOLER - parametr określający tolerancję związaną ze zbieżnością procedury przyrostowej.

MITER - największa żądana liczba iteracji

NOUTP(1) - parametr sterujący wydrukiem wyników niezbędnych po pierwszej iteracji. Dla każdego przyrostu obciążenia możemy nadać temu parametrowi następującą wartość:

- 1 - drukuj przemieszczenia po pierwszej iteracji,
- 2 - drukuj przemieszczenia i reakcje w węzłach po pierwszej iteracji,
- 3 - drukuj przemieszczenia, reakcje i naprężenia po pierwszej iteracji.

NOUTP(2) - parametr sterujący wydrukiem zbieżnych wyników. Nadajemy mu następujące wartości:

- 1 - drukuj przemieszczenia końcowe,
- 2 - drukuj końcowe przemieszczenia i reakcje w węzłach,
- 3 - drukuj końcowe przemieszczenia, reakcje i naprężenia.

3.10. Podprogram ALGOR

Podprogram umożliwia realizację różnych algorytmów, które mogą być opcjonalnie dołączane do opisywanego programu. W obecnej wersji istnieje tylko jedna opcja służąca do sprężysto-plastycznej analizy ram przestrzennych metodą zmiennej sztywności.

Ponadto podprogram decyduje o konieczności modyfikacji macierzy sztywności dla danej iteracji zależnie od wartości parametru KRESL.

3.11. Podprogram STIFR

Podprogram oblicza macierz sztywności elementu dla materiału sprężystego, wykorzystując wzory podane w tabeli 1. Obowiązują one dla belek Bernoulli'ego.

3.12. Podprogram MP

Służy do generacji sprężysto-plastycznej macierzy sztywności elementu skończonego dla trzech przypadków uplastycznień, polegających na:

- a/ utworzeniu się przegubu plastycznego na lewym końcu elementu,
- b/ utworzeniu się przegubu plastycznego na prawym końcu elementu,
- c/ utworzeniu się przegubów plastycznych na obydwu końcach elementu.

Podprogram generuje macierz zgodnie ze wzorami typu (22). Zamieszczamy go w całości w załączniku nr 1.

3.13. Podprogram FRONT

Funkcja tego podprogramu polega na złożeniu globalnej macierzy sztywności całej konstrukcji oraz globalnego wektora obciążeń z komponentów określonych wcześniej dla poszczególnych elementów, a następnie rozwiązaniu otrzymanego układu równań frontalną metodą bezpośredniej eliminacji Gaussa. Składanie macierzy sztywności i eliminacja zmiennych odbywa się równocześnie. Szczegóły algorytmu można znaleźć w pracy [6], rozdział 8 oraz w pracy [3], str. 194-195.

3.14. Podprogram RESIDR

Podprogram wylicza naprężenia na podstawie macierzy sztywności elementu w układzie lokalnym i wektora przemieszczeń węzłowych w elemencie wg znanego wzoru

$$(25) \quad \underline{Q}_i = \underline{k}_{ij} \underline{U}_j$$

w którym $i, j = 1, \dots, 6.$

3.15. Podprogram CONVR

Służy do kontroli zbieżności procesu iteracyjnego.

3.16. Podprogram INVAR

Podprogram ten liczy wektor wypadkowy naprężenia oraz funkcję opisującą warunek plastyczności w rozpatrywanym węźle, wykorzystując wzory (23) i (24).

3.17. Podprogram ROZRKW

Funkcją tego podprogramu jest wyznaczenie wartości mnożnika obciążenia DLAM, która powoduje znalezienie się końca wektora wewnętrznych sił uogólnionych działających w przekroju przywęzłowym na powierzchni stanu granicznego. Obciążenie pomnożone przez ten mnożnik wywołuje więc powstanie przegubu plastycznego w rozpatrywanym węźle. Program porównuje mnożniki wyliczone dla wszystkich węzłów i wybiera najmniejszy, a więc taki, który powoduje utworzenie się minimalnej liczby przegubów w kolejnym przyroście obciążenia. W ostatecznej wersji programu podprogramy INVAR i ROZRKW zostaną połączone.

3.18. Podprogram OUTPUT

Służy do wyprowadzenia wyników: przemieszczeń, reakcji i naprężeń. Częstotliwość wydruku jest sterowana parametrami NOUT P(1) i NOUT P(2), zgodnie z instrukcją wprowadzania danych podaną w rozdziale 5.

4. Przykłady obliczeń

Poprawność zaprezentowanej metody nieliniowej analizy ram przestrzennych oraz programu ASGRAM-3D sprawdzono przeliczając trzy przykłady opisane w pracy [7]. Wykorzystano warunek stanu granicznego dany wzorem (23). Otrzymane rozwiązania zgadzają się z wynikami przedstawionymi w pracy [7].

Przykład 1

Rozpatrzono zachowanie się pręta wygiętego pod kątem prostym i obciążonego siłą skupioną przyłożoną jak na rys.3. Zastosowano przyrosty obciążenia wynoszące w przybliżeniu 1/3 wartości przyrostu niezbędnej do utworzenia się kolejnego przegubu plastycznego. Zależność pomiędzy obciążeniem i ugięciem punktu przyłożenia siły skupionej pokazano na rys. 3, na którym naniesiono również wszystkie dane niezbędne do przeprowadzenia obliczeń.

Przykład 2.

Prosta rama przestrzenna jak na rys. 4 została obciążona siłą skupioną. W pracy [7] opisano doświadczenie prowadzące do zniszczenia tej ramy przy obciążeniu $P_{u \text{ exp}} = 5.90$. Obliczenia przy pomocy programu ASGRAM-3D dały wynik $P_u = 5.70$, a ponadto pozwoliły określić kolejne etapy tworzenia się przegubów plastycznych. W załączniku nr 2 podano zestaw danych potrzebnych do policzenia tego przykładu, przygotowanych zgodnie z rozdziałem 5, oraz część wyników obliczeń.

Przykład 3

Rama pokazana na rys. 5, obciążona siłą skupioną P była analizowana numerycznie w pracy [7], w której omówiono ponadto wyniki doświadczenia. Porównanie przyniosło następujące rezultaty:

| | |
|-----------------------------|---|
| $P_u \text{ exp} = 6.72$ | eksperyment, którego wyniki podano w pracy [7] |
| $P_u \text{ analit} = 7.13$ | obliczenia analityczne metodą rozwiązań sprężystych |
| $P_u = 6.85$ | [7] |
| $P_u = 7.20$ | ASGRAM-3D |

5. Instrukcja przygotowania danych

1. Karta tytułowa (18 A 4)

kol. 1-72 - TYTUŁ - ciąg znaków alfanumerycznych służący do identyfikacji zadania

2. Karta kontrolna /8I5/

| | | |
|----------|-------|--|
| kol. 1-5 | NPOIN | - liczba węzłów |
| 6-10 | NELEM | - liczba elementów |
| 11-15 | NVFIX | - liczba węzłów z ograniczeniami kinematycznymi |
| 16-20 | NNODE | - liczba węzłów w elemencie NNODE=2 |
| 21-25 | NMATS | - liczba różnych rodzajów elementów skończonych /jako jeden rodzaj elementów rozumiemy elementy mające równe kosinusy kierunkowe oraz równe: $E, \nu, I_x, I_y, I_z, A, \bar{I}$ i \bar{C}_0 / |
| 26-30 | NALGO | - rodzaj algorytmu. W obecnej wersji przyjmujemy NALGO=2 /metoda zmiennej sztywności/ |
| 31-35 | NCRIT | - typ przekroju /w obecnej wersji przyjmujemy NCRIT=1 dla przekrojów dowolnych lub NCRIT=4 dla przekrojów dwuteowych/ |
| 36-40 | NINCS | - liczba przyrostów obciążenia |

3. Karty identyfikacyjne elementów. NUMEL kart (415) ułożonych w kolejności elementów

- kol. 1-5 numer elementu,
- 6-10 numer rodzaju elementu,
- 10-15 numer pierwszego węzła elementu,
- 16-20 numer drugiego węzła elementu.

4. Karty opisujące geometrię konstrukcji. NPOIN kart (I5, 3F10.0) ułożonych w kolejności węzłów:

- kol. 1-5 numer węzła,
- 6-15 współrzędna x węzła,
- 16-25 współrzędna y węzła,
- 26-35 współrzędna z węzła.

5. Karty warunków brzegowych. NVFIX kart (1X, I4, 4X, 6I1, 5X, 6 F 10.6) ułożonych w kolejności węzłów z ograniczeniami kinematycznymi.

- kol. 2-5 - numer węzła z ograniczeniami kinematycznymi
- 10-15 - zero-jedynkowy kod ograniczeń kinematycznych, w którym kolejnym stopniom swobody odpowiadają cyfry: 0, jeśli danemu stopniowi swobody odpowiada ruch swobodny, lub 1, jeśli dany stopień swobody jest odebrany, lub z góry zadany. Kod podajemy dla następującej kolejności stopni swobody: $\{ r_x, r_y, r_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z \}$, przy czym r_x, r_y i r_z oznaczają translacje węzła odpowiednio w kierunkach x, y i z lokalnego układu współrzędnych, zaś φ_x, φ_y i φ_z oznaczają kąty obrotu rozpatrywanego węzła względem tych osi
- 21-30 - zadana wartość przemieszczenia r_x
- 31-40 - " " " r_y
- 41-50 - " " " r_z
- 51-60 - " " " obrotu φ_x
- 61-70 - " " " φ_y
- 71-80 - " " " φ_z

6. NMATS zbiorów trzykartowych, opisujących własności materiałowe oraz cechy geometryczne przekrojów belek, zgodnie z podrozdziałem 3.3 *

a/ karta kontrolna (I5)

kol. 1-5 - numer rodzaju elementu .

b/ karta cech i własności (5 F 10.5)

kol. 1-10 - moduł sprężystości E ,

11-20 - graniczna siła osiowa ,

21-30 - współczynnik Poissona ν ;

31-40 - biegunowy moment bezwładności I_x ,

41-50 - moment graniczny M_{Ygr}

c/ karta cech i własności (5 F 10.5)

kol. 1-10 - moment graniczny M_{zgr} ,

11-20 - moment bezwładności przekroju I_z ,

21-30 - pole przekroju poprzecznego belki A ,

31-40 - moment bezwładności przekroju I_y ,

41-50 - granica plastyczności σ_{IG} .

Przewidziano możliwość automatycznej generacji wskaźników przekrojów dwuteowych oraz wartości granicznych sił przekrojowych przy pomocy programu GEOMP.

W tym przypadku w kartach 6b i 6c specyfikujemy jedynie wymiary przekrojów, zgodnie z rozdziałem 3.4. W karcie kontrolnej należy podać parametr $NCRIT=4$.

7. Karta tytułowa obciążeń (18A4)

kol. 1-72 TYTUŁ - ciąg znaków alfanumerycznych identyfikujących przypadek obciążenia

* patrz, dokładniejsze omówienie tych danych^N podrozdziale 3.3.

8. Karty obciążeniowe (I5, 6 F 10.3)

Karty te pisze się tylko dla węzłów obciążonych i dla węzła o największym numerze /jedna karta dla węzła/

Kol. 1-5 - numer węzła obciążonego
6-15 - obciążenie w kierunku osi x ,
16-25 - " " " Y ,
26-35 - " " " z ,
36-45 - " wokół osi x ,
46-55 - " " " Y ,
56-65 - " " " z .

9. Karty kontrolne przyrostów obciążenia. Jedna karta dla każdego przyrostu obciążenia. łącznie NINCS kart (2F10.5, 3I5)

Kol. 1-10 FACTO - Mnożnik obciążenia dla danego przyrostu, wprowadzany jako mnożnik wartości obciążeń podanych w kartach 8
11-20 TOLER - parametr określający tolerancję związaną ze zbieżnością procedury przyrostowej
21-30 MITER - największa żądana liczba iteracji^z
31-40 NOU TP 1 parametr kontrolny wydruku wyników po pierwszej iteracji:
0 - nic nie drukuj,
1 - drukuj przemieszczenia,
2 - drukuj przemieszczenia i reakcje,
3 - drukuj przemieszczenia, reakcje i naprężenia .
41-50 NOU TP 2 parametr kontrolny wydruku wyników po osiągnięciu zbieżności:
0 - nic nie drukuj,
1 - drukuj przemieszczenia,
2 - drukuj przemieszczenia i reakcje,
3 - drukuj przemieszczenia, reakcje i naprężenia .

^z W obecnej wersji programu procedura iteracyjna nie jest wykorzystywana i parametr ten może być nie specyfikowany.

6. Spis literatury

1. BAUER J., KLEIBER M., SOSNOWSKI W.: Numeryczna analiza dwuteowych sprężysto-plastycznych ram płaskich z uwzględnieniem wybożenia środników, Część I, Podstawy analizy oraz analiza sprężysto-plastyczna, Rozprawy Inżynierskie, 33, 3, 353-357, 1985. Część II, Analiza lokalnego wybożenia środników i przykłady obliczeń, Rozprawy Inżynierskie, 33, 3, 379-399, 1985.
2. SOSNOWSKI W., Statyczna analiza płaskich sprężysto-plastycznych ram dwuteowych z uwzględnieniem możliwości lokalnego wybożenia środników /praca doktorska/, Prace IPPT, No 18/1982.
3. OWEN D.R.J., HINTON E., Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice, Prineridge Press, Swansea, 1980.
4. OLEJNIK M., SOSNOWSKI W., ZACHARSKI A., Liniowa analiza płyt usztywnionych metodą elementów skończonych. Prace IPPT, No 13, 1985.
5. BORKOWSKI A., Statyczna analiza układów prętowych w zakresie sprężystym i plastycznym, PWN, Warszawa-Poznań, 1985.
6. HINTON E., OWEN D.R.J., Finite Element Programming, Academic Press, London 1977.
7. UEDA Y., YAMAKAWA T., AKAMATSU T., A new theory on elastic-plastic analysis of framed structures, Technology Reports of the Osaka University, Vol. 19, N 875, 1969.

7. Załącznik 1 - Wydruk podprogramu MP generującego macierz sztywności sprężysto-plastycznej elementu ramy przestrzennej

```
      SUBROUTINE MP (STRES,LAMB,MELEM,IELEM,PROPS,MMATS,NPROP,MATNO)
      C*****
      C
      C   MACIERZ SZTYWNOŚCI S-P ELEMENTU BELKOWEGO W J-D
      C
      C*****
      C
      C   DIMENSION STIFFI(12),FI(12),STP(12,12),
      C   * FISTIF(12),STFI(12),FIST(12),
      C   *FISTI(12),FIST2(12),FIST3(12),LAMB(MELEM),PROPS(MMATS,NPROP)
      C   * ,MATNO(MELEM),STRES(12)
      C   COMMON A(12,12),ESTIF(12,12),STIF(12,12)
      C   IMAT=MATNO(IELEM)
      C
      C   ZEPROWANIE
      C
      C   DO 1 I=1,12
      C   DO 1 J=1,12
      C   STP(I,J)=0.
      C   STIFFI(I)=0.
      C
      C   WEKTOR GRADIENTOW
      C
      C   DNO=PROPS(IMAT,19)
      C   DMOY=PROPS(IMAT,20)
      C   DMOZ=PROPS(IMAT,21)
      C   DMOY=DMOZ
      C   DMOZ=(DMOY+DMOZ)*0.5
      C   WRITE(6,910)DNO,DMOY,DMOZ
      C   910  FORMAT(1H0,5X,4HDNO=,E14.6,2X,5HDMOY =,E14.6,2X,5HDMOZ=,E14.6)
      C   DO 15 I=1,2
      C   J=(1-I)*6
      C   FI(1+J)=2*STRES(1+J)/DNO/DNO
      C   FI(2+J)=8*STRES(2+J)/DNO/DNO
      C   FI(3+J)=8*STRES(3+J)/DNO/DNO
      C   FI(4+J)=1./DMOY
      C   FI(5+J)=1./DMOY
      C   FI(6+J)=1./DMOZ
      C
      C   CC
      C   CC   WSTAWKA TYLKO DLA NCRIT=0 *
      C   CC
      C   IF(NCRIT.EQ.0) FI(2)=2*STRES(2)/DMOY/DMOY
      C   IF(NCRIT.EQ.0) FI(8)=2*STRES(8)/DMOY/DMOY
      C   15  CONTINUE
      C   DO 16 I=4,6
      C   16  IF(STRES(I).EQ.0.) FI(I)=0.
      C   DO 17 I=10,12
      C   17  IF(STRES(I).EQ.0.) FI(I)=0.
      C   WRITE(6,915) (FI(I),I=1,12)
      C   915  FORMAT(1H0,6HF(I)=,12(1X,E10.3))
      C   N=LAMB(IELEM)
      C
      C   WYBÓR MACIERZY
      C   C   N=1 LEWY KONIEC UPŁASTYCZNIONY, LAM(1)*#0
      C   C   N=2 PRAWY KONIEC UPŁASTYCZNIONY, LAM(2)*#0
      C   C   N=3 OBYDWA KONCE UPŁASTYCZNIONE, LAM(1)*#0,LAM(2)*#0
```

```
C
      IF (N.EQ.2) GO TO 101
C
C      1
C
      DO 10 I=1,6
      STIFF(I)=0.
      DO 10 J=1,6
      STIFF(I)=STIFF(I)+STIF(I,J)*FI(J)
10     CONTINUE
C
C      1A
C
      DO 20 I=1,6
      FISTIF(I)=STIFF(I)
20     CONTINUE
C
C      2
C      2      K11#F11#F11#K11
C
      DO 30 I=1,6
      DO 30 J=1,6
30     STP(I,J)=STIFF(I)*STIFF(J)
C
C      3 CA
C
      CA=0.
      DO 40 I=1,6
      CA=CA+STIFF(I)*FI(I)
40     CONTINUE
C
C      4      F11#K12
C
      DO 50 I=7,12
      FISTIF(I)=0.
      DO 50 J=1,6
      FISTIF(I)=FISTIF(I)+FI(J)*STIF(I,J)
50     CONTINUE
C
C      5      K11#F11#F11#K12
C
      DO 60 I=1,6
      DO 60 J=7,12
60     STP(I,J)=STIFF(I)*FISTIF(J)
C
C      6      K21#F11
C
      DO 70 I=7,12
      STIFF(I)=0.
      DO 70 J=1,6
70     STIFF(I)=STIFF(I)+STIF(I,J)*FI(J)
C
C
      IF (N.EQ.3) GO TO 101
C
C      7      K21#F11#F11#K11
```

```
c
      DO 80 I=7,12
      DO 80 J=1,6
80     STP(I,J)=STIFF(I)*STIFF(J)
c
c      8      K21#F11#F11T#K12
c
      DO 90 I=7,12
      DO 90 J=7,12
90     STP(I,J)=STIFF(I)*FISTIF(J)
c
c
      DO 100 I=1,12
      DO 100 J=1,12
      STIF(I,J)=STIF(I,J)-STP(I,J)/CA
100    CONTINUE
      WRITE(6,102)CA
102    FORMAT(1H0,5X,3MCA=,E14.6)
      GO TO 1000
101    CONTINUE
c
c      10     K12#F12
c
      DO 110 I=1,6
      STF(I)=0.
      DO 110 J=7,12
      STF(I)=STF(I)+STIF(I,J)*F1(J)
110    CONTINUE
c
c      11     F12T#K21
c
      DO 120 I=1,6
      FIST(I)=0.
      DO 120 J=7,12
120    FIST(I)=FIST(I)+F1(J)*STIF(I,J)
c
c      12     [12#F12#F12T#K21
c
      DO 130 I=1,6
      DO 130 J=1,6
130    STP(I,J)=STF(I)*FIST(J)
c
c      13     F12T#K22
c
      DO 140 I=7,12
      FIST(I)=0.
      DO 140 J=7,12
140    FIST(I)=FIST(I)+F1(J)*STIF(I,J)
c
c      14     X12#F12#F12T#K22
c
      DO 150 I=1,6
      DO 150 J=7,12
150    STP(I,J)=STF(I)*FIST(I)
c
c      15     K22#F12
```



```
c
      DO 160 I=7,12
      STFI(1)=0.
      DO 160 J=7,12
160    STFI(1)=STFI(1)+STIF(I,J)*FI(J)
c
c      16      CB
c
c      CB=0.
      DO 170 J=7,12
170    CB=CB+FIST(J)*FI(J)
c
c
      IF(N.EQ.3) GO TO 201
c
c      17      K22=FI2*FI2T*K21
c
      DO 180 I=7,12
      DO 180 J=1,6
180    STP(I,J)=STFI(1)*FIST(J)
c
c      18      K22=FI2*FI2T*K22
c
      DO 190 I=7,12
      DO 190 J=7,12
190    STP(I,J)=STFI(1)*FIST(J)
c
c
c      19
c
      DO 200 I=1,12
      DO 200 J=1,12
200    STIF(I,J)=STIF(I,J)-STP(I,J)/CB
202    WRITE(6,202)CB
      FORMAT(1H0,5X,3HCB=,E14.6)
c
      GO TO 1000
c
201    CONTINUE
c
c      20A=13*FI2*1A
c
c      FIS=0.
      DO 210 I=7,12
210    FIS=FIS+FIST(1)*FI(I)
      DO 220 I=1,6
220    FIST1(I)=FIS*FISTIF(I)
c
c      20B=20A-4*FI2*11
c
c      FS=0.
      DO 230 I=7,12
230    FS=FS+FISTIF(I)*FI(I)
      DO 240 I=1,6
240    FIST2(I)=FIST1(I)-FS*FIST(I)
c
```

```
c      20C=1A#F11#11
c
      F=0.
      DO 250 I=1,6
250    F=F+FISTIF(I)#F1(I)
      DO 260 I=1,6
260    FIST1(I)=F#FIST(I)
c
c      20D=20C-4#F12#1A
c
      DO 270 I=1,6
270    FIST3(I)=FIST1(I)-FS#FISTIF(I)
c
c      21A=13#F12#13
c
      DO 300 I=7,12
300    F151(I)=F15#FISTIF(I)
c
c      21B=21A-4#F12#13
c
      DO 310 I=7,12
310    FIST2(I)=FIST1(I)-FS#FIST(I)
c
c      21C=1A#F11#13
c
      DO 320 I=7,12
320    FIST1(I)=F#FIST(I)
c
c      21D=21C-4#F12#4
c
      DO 330 I=7,12
330    FIST3(I)=FIST1(I)-FS#FISTIF(I)
c
c      20=1#20B+10#20D
c      21=1#21B+15#21D
c      22=6#20B+15#20D
c      23=6#21B+15#21D
c
      DO 350 I=1,12
      DO 330 J=1,12
350    STP(I,J)=ST1FF(I)#FIST2(J)+STF1(I)#FIST3(J)
c
c      CAB
c
      CAB=0.
      DO 400 I=7,12
400    CAB=CAB+FISTIF(I)#F1(I)
      WRITE(6,930)CA,CB,CAB
      IF(CAB.EQ.0.) CAB=1.
930    FORMAT(1H0,5X,3HCA=,E14.6,3X,3HCB=,E14.6,3X,4Hcab=,E14.6)
      CAB=CA#CB-CAB#CAB
c
      DO 500 I=1,12
      DO 500 J=1,12
500    STIF(I,J)=STIF(I,J)-STP(I,J)/CAB
1000  CONTINUE
      WRITE(6,1010)((STIF(I,J),J=1,12),I=1,12)
1010  FORMAT(1H ,12(E10.3,1X))
      RETURN
      END
```

8. Załącznik 2 - Wydruk danych i wyników dla przykładu nr 2.

```

18
ueda, str. 272, wsr4n, analiza nieliniowa (5 elem.)
 6   5   4   2   3   2   1   7
 1   1   1   2
 2   2   2   3
 3   3   2   5
 4   1   4   5
 5   2   5   6
 1   0.   0.   0.   0.
 2   0.   0.   710.
 3  -1058. 0.   710.
 4   0.   1001. 0.
 5   0.   1001. 710.
 6  -1058. 1001. 710.
 1   111111
 3   111111
 4   111111
 6   111111
 1
21000.   28325.   .3   780513.   495600.
495600.   390257.   1030.   390257.   3000.
 2
21000.   28325.   .3   780513.   495600.
495600.   390257.   1030.   390257.   3000.
 3
21000.   23842.65   .3   400606.   354000.
354000.   200303.   750.   200303.   3000.
*** obciążenie Py 2 ***
 2   0.   2000.
 6
1.35   2.   1   3   2
0.050   2.   1   3   2
0.150   2.   1   3   2
0.150   2.   1   3   2
0.050   2.   1   3   2
0.350   2.   1   3   2
0.200   2.   1   3   2

```

ueda, str. 272, wsr4n, analiza nieliniowa (5 ele

NPQIN = 6 NELEM = 5 NVFIX = 4

MMGDE = 2 MMATS = 3 MEVAB = 12

NALGO = 2 MCRIT = 1 NINCS = 7

| ELEMENT | PROPERTY | NODE NUMBERS |
|---------|----------|--------------|
| 1 | 1 | 1 2 |
| 2 | 2 | 2 3 |
| 3 | 3 | 2 5 |
| 4 | 1 | 4 5 |
| 5 | 2 | 5 6 |

| NODE | X | Y | Z |
|------|-----------|----------|---------|
| 1 | .000 | .000 | .000 |
| 2 | .000 | .000 | 710.000 |
| 3 | -1058.000 | .000 | 710.000 |
| 4 | .000 | 1001.000 | .000 |
| 5 | .000 | 1001.000 | 710.000 |
| 6 | -1058.000 | 1001.000 | 710.000 |

| NODE | CODE | FIXED VALUES | | | | | |
|------|--------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 111111 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 |
| 3 | 111111 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 |
| 4 | 111111 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 |
| 6 | 111111 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 | .000000 |

| NUMBER | ELEMENT PROPERTIES | | | | | |
|--------|--------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| 1 | .210000E+05 | .300000E+00 | .283250E+05 | .300000E+04 | .780513E+06 | .390257E+06 |
| 0 1 | .495600E+06 | .495600E+06 | | | | |
| 1 | .390257E+06 | .103000E+04 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .100000E+01 |
| 0 1 | .495600E+06 | .495600E+06 | | | | |
| 1 | .000000E+00 | .100000E+01 | .000000E+00 | -.100000E+01 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| 0 1 | .495600E+06 | .495600E+06 | | | | |
| 2 | .210000E+05 | .300000E+00 | .283250E+05 | .300000E+04 | .780513E+06 | .390257E+06 |
| 0 2 | .495600E+06 | .495600E+06 | | | | |
| 2 | .390257E+06 | .103000E+04 | .000000E+00 | -.100000E+01 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| 0 2 | .495600E+06 | .495600E+06 | | | | |
| 2 | .000000E+00 | -.100000E+01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .100000E+01 |
| 0 2 | .495600E+06 | .495600E+06 | | | | |
| 3 | .210000E+05 | .300000E+00 | .238427E+05 | .300000E+04 | .400606E+06 | .200303E+06 |
| 0 3 | .354000E+06 | .354000E+06 | | | | |
| 3 | .200303E+06 | .750000E+03 | .000000E+00 | .000000E+00 | .100000E+01 | .000000E+00 |
| 0 3 | .354000E+06 | .354000E+06 | | | | |
| 3 | -.100000E+01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .100000E+01 |
| 0 3 | .354000E+06 | .354000E+06 | | | | |

MAXIMUM FRONTWIDTH ENCOUNTERED = 12

0111 obciazenie Pw 2 111

| | | | | | | |
|---|------|----------|------|------|------|------|
| 2 | .000 | 2000.000 | .000 | .000 | .000 | .000 |
| 6 | .000 | .000 | .000 | .000 | .000 | .000 |

0 TOTAL NODAL FORCES FOR EACH ELEMENT


```

1      .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
      .00000E+00  .20000E+04  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
2      .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
      .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
3      .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
      .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
4      .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
      .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
5      .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
      .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
0 INCREMENT NUMBER      1
0 LOAD FACTOR = 1.35000      CONVERGENCE TOLERANCE = 2.00000      MAX. NO. OF ITERATIONS = 1

INITIAL OUTPUT PARAMETER = 3      FINAL OUTPUT PARAMETER = 2
F(1) = .100189E+01      .611042E+00
LAM=0
F(1) = .409745E+00      .550044E+00
LAM=0
F(1) = .913525E+00      .908415E+00
LAM=0
F(1) = .990000E+00      .605564E+00
LAM=0
F(1) = .405269E+00      .543239E+00
LAM=0
0 CONVERGENCE CODE = 999      NORM OF RESIDUAL SUM RATIO = .100000E+03      MAXIMUM RESIDUAL = .453110E+06
0 SPLACEMENTS
0      NODE      X      Y      Z      TX      TY      TZ
1      .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00
2      1.08043E-01  .662963E+01  .136615E-01  -.838516E-02  .542651E-05  .449362E-02
3      .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00
4      .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00
5      -1.08043E-01  .654427E+01  -.136615E-01  -.824760E-02  .542651E-05  .441593E-02
6      .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00  .000000E+00
0 REACTIONS
0      NODE      RX      RY      RZ      RMX      RMY      RMZ
1      -.243941E+01  -.100372E+04  -.416194E+03  .453110E+06  -.928627E+03  -.398992E+05
3      -.220885E+03  -.353134E+03  -.137285E+01  .499634E+05  .684202E+03  -.221616E+06
4      .243941E+01  -.993686E+03  .416194E+03  .447959E+06  .928627E+03  -.392094E+05
6      .220885E+03  -.349458E+03  .137285E+01  .491437E+05  -.684202E+03  -.219070E+06
0 STRESSES
0 ELEMENT NO. = 1
      .416194E+03  -.100372E+04  .243941E+01  -.398992E+05  -.928627E+03  -.453110E+06
      .416194E+03  -.100372E+04  .243941E+01  -.398992E+05  .803353E+03  .259534E+06
0 ELEMENT NO. = 2
      .220885E+03  -.353134E+03  .137285E+01  .499634E+05  -.768271E+03  -.152000E+06
      .220885E+03  -.353134E+03  .137285E+01  .499634E+05  .684202E+03  .221616E+06
0 ELEMENT NO. = 3
      -.134314E+04  .223324E+03  -.417567E+03  .350816E+02  .209570E+06  .112100E+06
      -.134314E+04  .223324E+03  -.417567E+03  .350816E+02  -.208414E+06  -.113447E+06
0 ELEMENT NO. = 4
      -.416194E+03  -.993686E+03  -.243941E+01  -.392094E+05  .928627E+03  -.447959E+06
      -.416194E+03  -.993686E+03  -.243941E+01  -.392094E+05  -.803353E+03  .257558E+06
0 ELEMENT NO. = 5
      -.220885E+03  -.349458E+03  -.137285E+01  .491437E+05  .768271E+03  -.150657E+06
      -.220885E+03  -.349458E+03  -.137285E+01  .491437E+05  -.684202E+03  .219070E+06
0 INCREMENT NUMBER      2

```


F(1)= .108522E+01 .107940E+01
 LAM=3
 F(1)= .117325E+01 .712203E+00
 LAM=1
 F(1)= .492124E+00 .652932E+00
 LAM=0

CONVERGENCE CODE = 1 NORM OF RESIDUAL SUM RATIO = .100000E+03 MAXIMUM RESIDUAL = .506670E+06

DISPLACEMENTS

| MODE | X | Y | Z | TX | TY | TZ |
|------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| 2 | .167494E-01 | .794745E+01 | .168154E-01 | -.977309E-02 | -.267637E-03 | -.551380E-02 |
| 3 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| 4 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| 5 | -.102169E-01 | .784942E+01 | -.160243E-01 | -.961969E-02 | -.278082E-03 | -.542237E-02 |
| 6 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

REACTIONS

| MODE | RX | RY | RZ | RMX | RMV | RMZ |
|------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 1 | .601296E+02 | -.113971E+04 | -.497169E+03 | .506670E+06 | .351719E+05 | -.406986E+05 |
| 2 | -.334251E+03 | -.417752E+03 | .103606E+02 | .582334E+05 | -.340761E+04 | -.263702E+06 |
| 4 | .652439E+02 | -.112891E+04 | .473262E+03 | .501203E+06 | .369692E+05 | -.399935E+05 |
| 6 | .208977E+03 | -.413628E+03 | .135465E+02 | .573194E+05 | -.501205E+04 | -.260811E+06 |

STRESSES

| ELEMENT NO. | X | Y | Z | TX | TY | TZ |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | .497169E+03 | -.113971E+04 | -.601296E+02 | -.406986E+05 | .351719E+05 | -.506670E+06 |
| 2 | .497169E+03 | -.113971E+04 | -.601296E+02 | -.406986E+05 | -.752013E+04 | .302525E+06 |
| 3 | .334251E+03 | -.417752E+03 | -.103606E+02 | .582334E+05 | .755390E+04 | -.178280E+06 |
| 4 | .334251E+03 | -.417752E+03 | -.103606E+02 | .582334E+05 | -.340761E+04 | .263702E+06 |
| 5 | -.154253E+04 | .274121E+03 | -.486808E+03 | .337650E+02 | .244292E+06 | .137582E+06 |
| 6 | -.154253E+04 | .274121E+03 | -.486808E+03 | .337650E+02 | -.243003E+06 | -.136813E+06 |
| 7 | -.473262E+03 | -.112891E+04 | -.652439E+02 | -.399935E+05 | .369692E+05 | -.501203E+06 |
| 8 | -.473262E+03 | -.112891E+04 | -.652439E+02 | -.399935E+05 | -.935393E+04 | .300322E+06 |
| 9 | -.208977E+03 | -.413628E+03 | -.135465E+02 | .573194E+05 | .932017E+04 | -.176807E+06 |
| 10 | -.208977E+03 | -.413628E+03 | -.135465E+02 | .573194E+05 | -.501205E+04 | .260811E+06 |

INCREMENT NUMBER 4

LOAD FACTOR = 1.70000 CONVERGENCE TOLERANCE = 2.00000 MAX. NO. OF ITERATIONS = 1

INITIAL OUTPUT PARAMETER = 3 FINAL OUTPUT PARAMETER = 2

DNO= .283250E+05 DTD = .495600E+06 DMOZ= .495600E+06
 F(1)= .12E-05 -.93E-08 -.60E-06 .20E-05 .20E-05 .20E-05 .12E-05 -.93E-08 -.60E-06 .20E-05 .20E-05 .20E-05
 CA= .412387E-03
 DNO= .238427E+05 DTD = .354000E+06 DMOZ= .354000E+06
 F(1)= -.54E-05 .44E-08 -.69E-05 .28E-05 .28E-05 .28E-05 .54E-05 .44E-08 -.69E-05 .28E-05 .28E-05 .28E-05
 CA= .295496E-03 CB= .293545E-03 CAB= .107870E-03
 DNO= .283250E+05 DTD = .495600E+06 DMOZ= .495600E+06
 F(1)= -.12E-05 -.92E-08 -.65E-06 .20E-05 .20E-05 .20E-05 .12E-05 -.92E-08 -.65E-06 .20E-05 .20E-05 .20E-05
 CA= .412402E-03

F(1)= .142892E+01 .805354E+00
 LAM=1
 F(1)= .568319E+00 .798682E+00
 LAM=0
 F(1)= .108685E+01 .107975E+01
 LAM=3
 F(1)= .141862E+01 .802420E+00
 LAM=1
 F(1)= .566146E+00 .793288E+00
 LAM=0

Q CONVERGENCE CODE = 1 NORM OF RESIDUAL SUM RATIO = .100000E+03 MAXIMUM RESIDUAL = .558338E+06

0 DISPLACEMENTS

| 0 NODE | X | Y | Z | TX | TY | TZ |
|--------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 1 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| 2 | .211511E-01 | .989650E+01 | .186762E-01 | -.126572E-01 | -.729500E-03 | .809885E-02 |
| 3 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| 4 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| 5 | -.471081E-02 | .978894E+01 | -.165143E-01 | -.124944E-01 | -.734109E-03 | .800043E-02 |
| 6 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

0 REACTIONS

| 0 NODE | RX | RY | RZ | RMX | RMV | RMZ |
|--------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 1 | .165723E+03 | -.124209E+04 | -.524730E+03 | .558338E+06 | .959563E+05 | -.498302E+05 |
| 3 | -.432418E+03 | -.466045E+03 | .304952E+02 | .754186E+05 | -.104812E+05 | -.309273E+06 |
| 4 | .170386E+03 | -.123043E+04 | .160615E+03 | .552557E+06 | .974268E+05 | -.491394E+05 |
| 6 | .963089E+02 | -.461436E+03 | .336199E+02 | .744482E+05 | -.120984E+05 | -.306072E+06 |

0 STRESSES

| 0 ELEMENT NO. = | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | .524730E+03 | -.124209E+04 | -.165723E+03 | -.498302E+05 | .959563E+05 | -.558338E+06 |
| | .524730E+03 | -.124209E+04 | -.165723E+03 | -.498302E+05 | -.217071E+05 | .323546E+06 |
| | .432418E+03 | -.466045E+03 | -.304952E+02 | .754186E+05 | .217828E+05 | -.183803E+06 |
| | .432418E+03 | -.466045E+03 | -.304952E+02 | .754186E+05 | -.104812E+05 | .309273E+06 |
| | -.169185E+04 | .266695E+03 | -.494235E+03 | .756294E+02 | .248128E+06 | .133973E+06 |
| | -.169185E+04 | .266695E+03 | -.494235E+03 | .756294E+02 | -.246601E+06 | -.132988E+06 |
| | -.460615E+03 | -.123043E+04 | -.170386E+03 | -.491394E+05 | .974268E+05 | -.552557E+06 |
| | -.460615E+03 | -.123043E+04 | -.170386E+03 | -.491394E+05 | -.235471E+05 | .321049E+06 |
| | -.963089E+02 | -.461436E+03 | -.336199E+02 | .744482E+05 | .234714E+05 | -.182128E+06 |
| | -.963089E+02 | -.461436E+03 | -.336199E+02 | .744482E+05 | -.120984E+05 | .306072E+06 |

0 INCREMENT NUMBER 5

0 LOAD FACTOR = 1.75000 CONVERGENCE TOLERANCE = 2.00000 MAX. NO. OF ITERATIONS = 1

INITIAL OUTPUT PARAMETER = 3 FINAL OUTPUT PARAMETER = 2

0 DND= .283250E+05 DTD = .495600E+06 DNDZ= .495600E+06
 F(1)= .13E-05 -.10E-07 -.17E-05 .20E-05 .20E-05 .20E-05 .13E-05 -.10E-07 -.17E-05 .20E-05 .20E-05 .20E-05
 CA= .412897E-03
 0 BND= .238427E+05 DTD = .354000E+06 DNDZ= .354000E+06
 F(1)= -.60E-05 .43E-08 -.70E-05 .28E-05 .28E-05 .28E-05 -.60E-05 .43E-08 -.70E-05 .28E-05 .28E-05 .28E-05
 CA= .295605E-03 CB= .293624E-03 CAB= .107776E-03
 0 DND= .283250E+05 DTD = .495600E+06 DNDZ= .495600E+06
 F(1)= -.11E-05 -.10E-07 -.17E-05 .20E-05 .20E-05 .20E-05 -.11E-05 -.10E-07 -.17E-05 .20E-05 .20E-05 .20E-05
 CA= .412813E-03

F(1)= .151120E+01 .835691E+00
 LAM=1
 F(1)= .593287E+00 .845748E+00
 LAM=0
 F(1)= .108744E+01 .107988E+01
 LAM=3
 F(1)= .150045E+01 .832547E+00
 LAM=1
 F(1)= .590027E+00 .840065E+00
 LAM=0

0 CONVERGENCE CODE = 1 NORM OF RESIDUAL SUM RATIO = .100000E+03 MAXIMUM RESIDUAL = .575567E+06

0 DISPLACEMENTS

| 0 | NODE | X | Y | Z | TX | TY | TZ |
|---|------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 0 | 1 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| 0 | 2 | .227509E-01 | .105458E+02 | .193140E-01 | -.136181E-01 | -.883630E-03 | .895991E-02 |
| 0 | 3 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| 0 | 4 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| 0 | 5 | -.287566E-02 | .104351E+02 | -.166691E-01 | -.134522E-01 | -.886203E-03 | .885932E-02 |
| 0 | 6 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

0 REACTIONS

| 0 | NODE | R1 | PY | RZ | RM1 | RM2 | RM3 |
|---|------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 0 | 1 | .200909E+03 | -.127623E+04 | -.533926E+03 | .575567E+06 | .116208E+06 | -.528749E+05 |
| 0 | 3 | -.465126E+03 | -.482139E+03 | .372130E+02 | .811442E+05 | -.128410E+05 | -.324456E+06 |
| 0 | 4 | .205426E+03 | -.126427E+04 | .456399E+03 | .569680E+06 | .117569E+06 | -.521905E+05 |
| 0 | 6 | .587905E+02 | -.477362E+03 | .403141E+02 | .801558E+05 | -.144615E+05 | -.321150E+06 |

0 SPESSES

0 ELEMENT NO. = 1

.533926E+03 -.127623E+04 -.200909E+03 -.528749E+05 .116208E+06 -.575568E+06
 .533926E+03 -.127623E+04 -.200909E+03 -.528749E+05 -.264381E+05 -.330555E+06

0 ELEMENT NO. = 2

.465126E+03 -.482139E+03 -.372130E+02 .811442E+05 .265304E+05 -.185647E+06
 .465126E+03 -.482139E+03 -.372130E+02 .811442E+05 -.128410E+05 .324456E+06

0 ELEMENT NO. = 3

-.174162E+04 .264216E+03 -.496713E+03 .922490E+02 .249411E+06 .132772E+06
 -.174162E+04 .264216E+03 -.496713E+03 .922490E+02 -.247799E+06 -.131708E+06

0 ELEMENT NO. = 4

-.456399E+03 -.126427E+04 -.205426E+03 -.521905E+05 .117569E+06 -.569680E+06
 -.456399E+03 -.126427E+04 -.205426E+03 -.521905E+05 -.282831E+05 .327955E+06

0 ELEMENT NO. = 5

-.587906E+02 -.477362E+03 -.403141E+02 .801558E+05 .281908E+05 -.183899E+06
 -.587906E+02 -.477362E+03 -.403141E+02 .801558E+05 -.144615E+05 .321150E+06

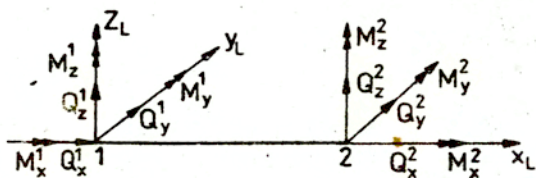
0 INCREMENT NUMBER 6

0 LOAD FACTOR = 2,10000 CONVERGENCE TOLERANCE = 2.00000 MAX. NO. OF ITERATIONS = 1

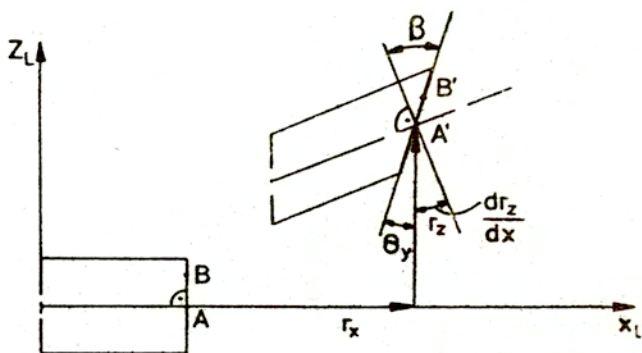
INITIAL OUTPUT PARAMETER = 3 FINAL OUTPUT PARAMETER = 2

0 DND= .283250E+05 DTD = .495600E+06 DNDZ= .495600E+06
 FI(1)= .13E-05 -.10E-07 -.20E-05 .20E-05 .20E-05 .20E-05 .13E-05 -.10E-07 -.20E-05 .20E-05 .20E-05 .20E-06
 CA= .412947E-03
 0 DND= .238427E+05 DTD = .354000E+06 DNDZ= .354000E+06
 FI(1)= -.61E-05 .42E-08 -.70E-05 .28E-05 .28E-05 .28E-05 -.61E-05 .42E-08 -.70E-05 .28E-05 .28E-05 .28E-09
 CA= .295643E-03 CB= .293652E-03 cab= .107743E-03
 0 DND= .283250E+05 DTD = .495600E+06 DNDZ= .495600E+06
 FI(1)= -.11E-05 -.10E-07 -.20E-05 .20E-05 .20E-05 .20E-05 -.11E-05 -.10E-07 -.20E-05 .20E-05 .20E-05 .20E-05
 CA= .412950E-03

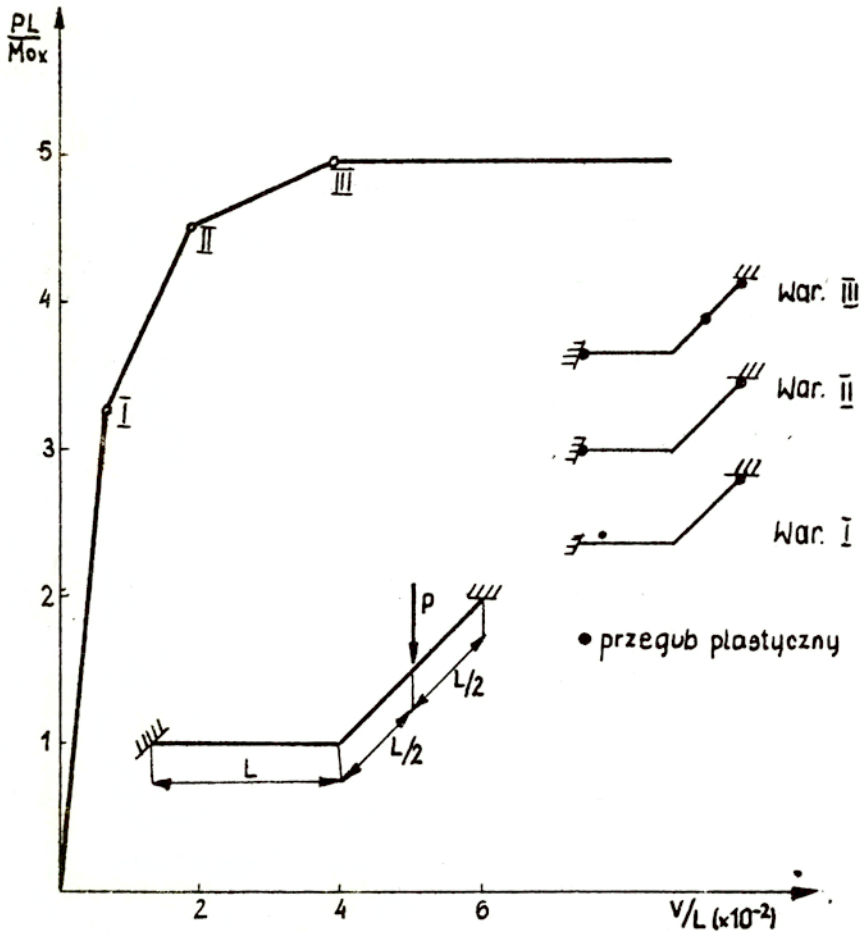
9. Rysunki.



Rys. 1



Rys. 2



$$EI = 3.98 \cdot 10^{10} \text{ kgf} \cdot \text{mm}^2$$

$$GJ = 3.04 \cdot 10^{10} \text{ kgf} \cdot \text{mm}^2$$

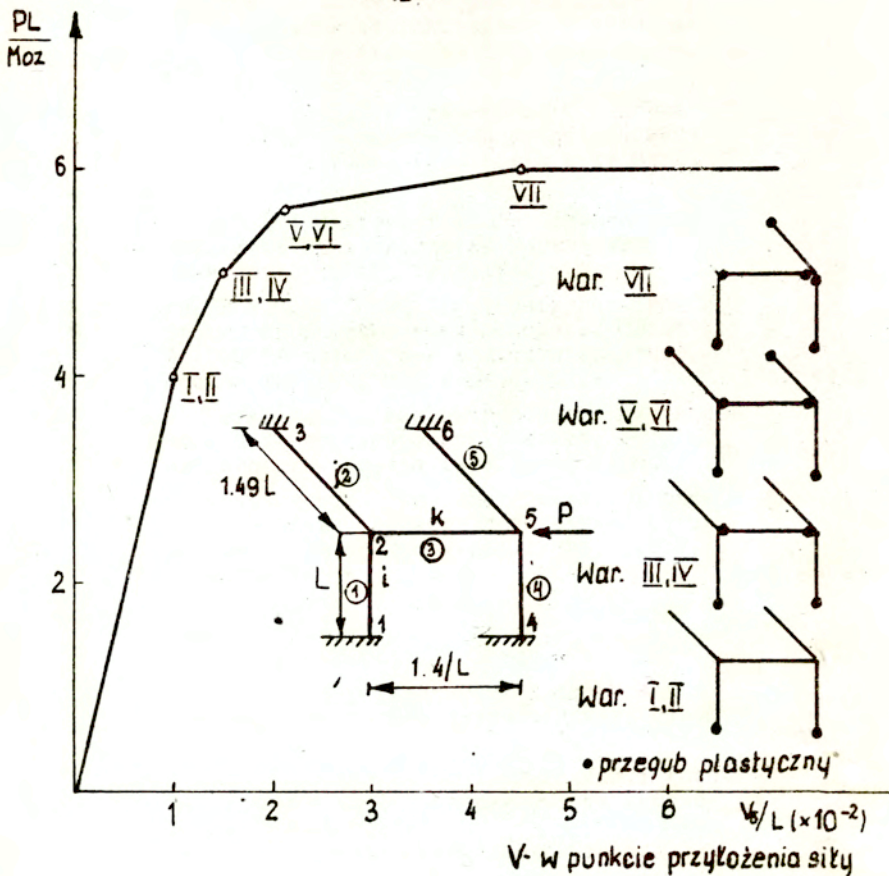
$$M_{0x} = 2.24 \cdot 10^6 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^2$$

$$M_{0z} = 1.76 \cdot 10^6 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^2$$

$$L = 1000 \text{ mm}$$

V - ugięcie w punkcie przyłożenia siły

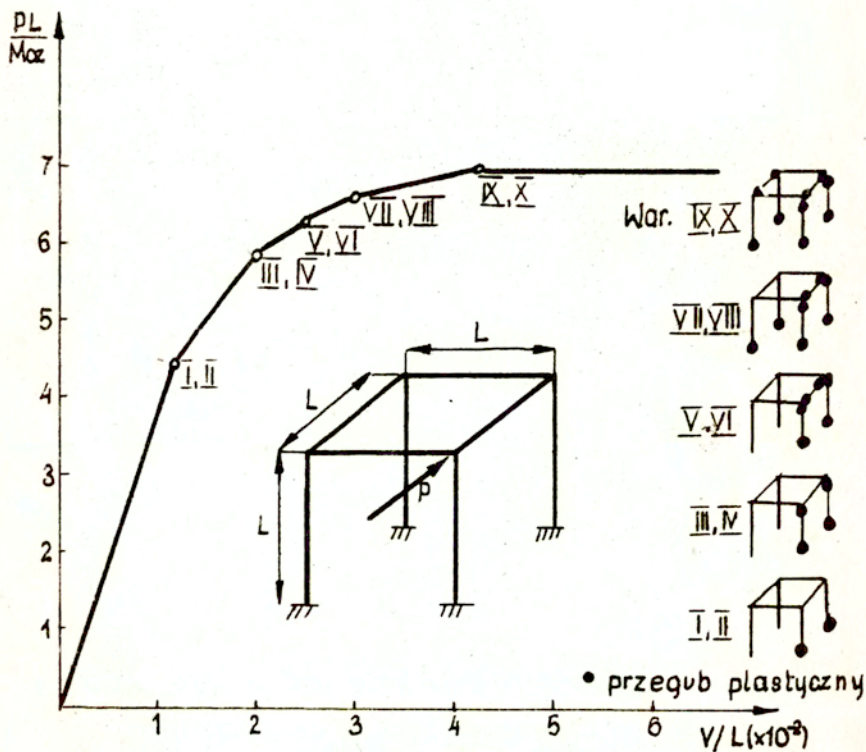
Rys. 3



| | Srednica zewn. rury . mm | Grubość scianki . mm | Napężenie plast. plyn. kgf/mm ² | Moment uplastyczniający t.mm |
|-----------|--------------------------|----------------------|--|------------------------------|
| Kolumna i | 60.73 | 5.99 | 27.5 | 495.5 |
| Belka j | 60.73 | 5.99 | 27.5 | 495.5 |
| Belka k | 50.93 | 5.30 | 31.4 | 354.0 |

$E=21000 \text{ kgf/mm}^2$ $L=710 \text{ mm}$.

Rys. 4



$EJ = 9.08 \cdot 10^9 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^2$
 $GJ = 6.98 \cdot 10^9 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^2$
 $M_{0x} = 5.04 \cdot 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{mm}$
 $M_{0y} = M_{0z} = 6.43 \cdot 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{mm}$
 $L = 710 \text{ mm}$

Rys. 5

10. Spis treści

| | str. |
|---|------|
| 1. Wstęp | 3 |
| 2. Algorytm postępowania | 4 |
| 3. Opis programu numerycznego | 11 |
| 4. Przykłady obliczeń | 21 |
| 5. Instrukcja przygotowania danych | 22 |
| 6. Spis literatury | 26 |
| 7. Załącznik 1 - Wydruk podprogramu MP generującego macierz sztywności sprężysto- -plastycznej elementu ramy przes- trzennej | 27 |
| 8. Załącznik 2 - Wydruk danych i wyników dla przy- kładu nr 2 | 32 |
| 9. Rysunki | 41 |
| 10. Spis treści | |