

§ 3 連続体構造物に対する有限要素解析

(1) 連続体の有限要素分割と変位関数

解析手順

連続体構造物に対する有限要素解析も、基本的にはトラス構造の解析と同様の手順で行われる。

手順1：要素の剛性方程式： $[K]_e\{U\}_e = \{F\}_e$ を作成する。

手順2：構造全系の剛性方程式： $[K]\{U\} = \{F\}$ を作成する。

手順3：外力と変位の境界条件を導入し、剛性方程式（連立一次方程式）を解く。

手順4：節点変位 $\{U\}$ から各要素内のひずみ $\{\epsilon\}$ や応力 $\{\sigma\}$ 等を計算する。

節点力・節点変位ベクトル

連続体構造物を分割表現する要素には種々の形状が考えられるが、ここでは最も簡単な三角形定ひずみ要素について説明する（図-3.1）。（a）図のように個々の要素は三角形の頂点を節点として互いに連結され、力を及ぼし合っている。（b）図は代表的な要素を示したものであり、節点番号を i, j, k とすると、要素の節点力および節点変位ベクトルは次のようになる。

$$\{F\}_e = \begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \\ X_j \\ Y_j \\ X_k \\ Y_k \end{Bmatrix} \quad \{U\}_e = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_k \\ v_k \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

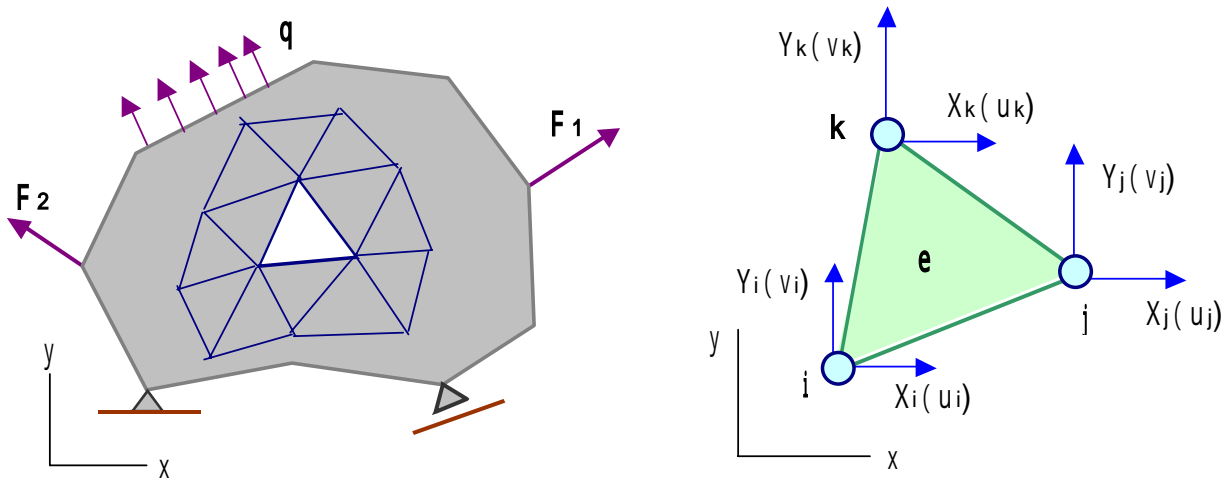


図 - 3.1 三角形要素

変位関数と形状関数

剛性方程式の誘導に際しては、要素内の任意点の変位と節点変位の関係を予め定めておく必要があり、このために「変位関数」が定義される。変位関数に用いる最も簡単な関数は x, y の一次式であり、この仮定によって要素内ではひずみが一定になるので、定ひずみ要素と呼ばれる。このとき、 $\{ \delta \} = \{ \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6 \}^T$ を未定常数として、要素内の変位 u, v は

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \delta_1 + \delta_2 x + \delta_3 y \\ v(x, y) &= \delta_4 + \delta_5 x + \delta_6 y \end{aligned} \quad (3.2)$$

で表される。もちろん、上式以外に x, y の 2 次、3 次など高次の成分を含む変位関数も考え得る。次数の高い関数を用いるほど要素内の変位は精度よく表現できるが、その代わり解析が煩雑になる。上式を行列表示するために、 u, v をまとめて $\{ \delta \}$ と置くと

$$\{ \delta \} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{Bmatrix} \{ \delta \} = [A] \{ \delta \} \quad (3.3)$$

上式の x, y に 3 つの節点の座標を代入すれば $\{ \delta \}$ は各節点の変位を表す。対応する座標や変位の成分に節点番号 i, j, k を添字として付け、3 つの節点の表示を 1 つにまとめると

$$\{ U \}_e = \begin{Bmatrix} \{ \delta_i \} \\ \{ \delta_j \} \\ \{ \delta_k \} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & x_i & y_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \end{Bmatrix} = [C] \{ \delta \} \quad (3.4)$$

上式を $\{ \delta \}$ について解き、 $\{ \delta \} = [C]^{-1} \{ U \}_e$ の形にしてから式(3.3)に代入すると、要素内の任意点の変位 $\{ \delta \}$ と節点変位 $\{ U \}_e$ の関係が定まる。 $[C]^{-1}$ を求めると

$$[C]^{-1} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} a_i & 0 & a_j & 0 & a_k & 0 \\ b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ c_i & 0 & c_j & 0 & c_k & 0 \\ 0 & a_i & 0 & a_j & 0 & a_k \\ 0 & b_i & 0 & b_j & 0 & b_k \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} a_i &= x_j y_k - x_k y_j \\ b_i &= y_j - y_k \\ c_i &= x_k - x_j \end{aligned} \quad (3.5)$$

A は三角形要素の面積であり、次式より定まる。

$$A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} = (y_i c_i + y_j c_j + y_k c_k) / 2 \quad (3.6)$$

以上から、要素内変位 { } と節点変位 {U}_e の関係は次のように表される。

$$\{ \} = [A][C]^{-1} \{U\}_e = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} a_i + b_i x + c_i y & 0 & \dots & \dots \\ 0 & a_i + b_i x + c_i y & \dots & \dots \end{bmatrix} \{U\}_e = [N] \{U\}_e \quad (3.7)$$

上の行列 [N] を「形状関数(shape function)」、または要素内部の変位を、節点変位を用いて補間する意味から「補間関数あるいは内挿関数」と呼ばれる。

形状関数の性質

図 - 3.2 のように三角形 i j k 内に 1 点 P を考えると、この三角形は点 P に関して面積 A_i, A_j, A_k の 3 つの三角形に分割される。ただし、節点 i に対面する面積が A_i になるように記号を付ける。点 P の位置によって 3 つの三角形の面積が変わるので、逆に 3 つの三角形の面積をもって点 P の位置、すなわち座標が定義できる。通常は元の三角形 i j k の面積 A との比をとって無次元化して次のように表す。

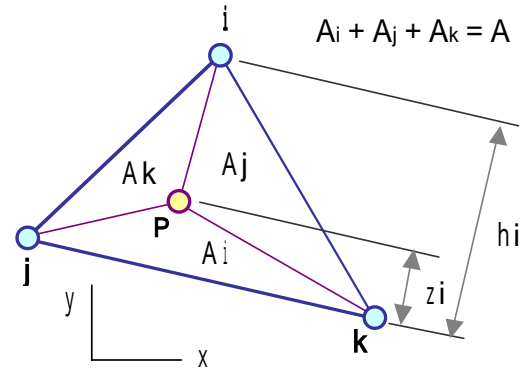


図 - 3.2 面積座標

$$L_i = A_i / A, \quad L_j = A_j / A, \quad L_k = A_k / A \quad (3.8)$$

これを「面積座標」という。上式の L_i などは図の垂直距離 z_i, h_i の比: L_i = z_i / h_i で定義されると考えてもよい。面積座標と x y 座標の関係は式 (3.6) のような行列式から求めることができる。例えば L_i は

$$L_i = A_i / A = \frac{\Delta Pjk}{A} = \frac{1}{2A} \begin{vmatrix} 1 & x & y \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} = (a_i + b_i x + c_i y) / 2A$$

$$\text{同様に} \quad \begin{aligned} L_j &= (a_j + b_j x + c_j y) / 2A \\ L_k &= (a_k + b_k x + c_k y) / 2A \end{aligned} \quad (3.9)$$

逆に、L_i + L_j + L_k = 1 なることを利用して、x, y について解くと

$$\begin{aligned} x &= L_i x_i + L_j x_j + L_k x_k \\ y &= L_i y_i + L_j y_j + L_k y_k \end{aligned} \quad (3.10)$$

を得る。上式は面積座標 (L_i, L_j, L_k) を介して節点座標と要素内座標を関係づける式であるが、“座標”を“変位”と読み替えて (x, y) (u, v) とすれば、節点変位と要素内変位の関係: 式(3.7)を与える。すなわち、式(3.9)で定義した面積座標は形状関数 [N] の成分になる。

$$\{ \} = \begin{bmatrix} L_i & 0 & L_j & 0 & L_k & 0 \\ 0 & L_i & 0 & L_j & 0 & L_k \end{bmatrix} \{U\}_e = [N] \{U\}_e \quad (3.11)$$

式(3.9)で x 、 y に節点座標を代入して面積座標 (L_i, L_j, L_k) の値を調べると

$$\begin{aligned} i \text{ 点 } (x = x_i, y = y_i) & \quad L_i = 1, L_j = 0, L_k = 0 \\ j \text{ 点 } (x = x_j, y = y_j) & \quad L_i = 0, L_j = 1, L_k = 0 \\ k \text{ 点 } (x = x_k, y = y_k) & \quad L_i = 0, L_j = 0, L_k = 1 \end{aligned}$$

すなわち、形状関数の成分 L_i は、ある 1 つの節点で大きさ “1”、他の節点で “0” となるような関数であり、例えば L_i を縦軸にとって要素 ijk 内での変化を調べると、図 - 3.3 (a) のようになる。この L_i -分布に節点変位 $\{ \quad \} = \{ u_i, v_i \}$ を乗じると、要素内の変位は節点 i で $\{ \quad \}$ 、節点 j 及び k でゼロの線形分布になる。同様に、 L_j -分布に $\{ \quad \}$ 、 L_k -分布に $\{ \quad \}$ を乗じて式(3.11) の加算を行うと、要素内部の変位 $\{ \quad \}$ は、(b) 図のように節点変位の線形結合で表されることになる。これが形状関数の物理的意味である。

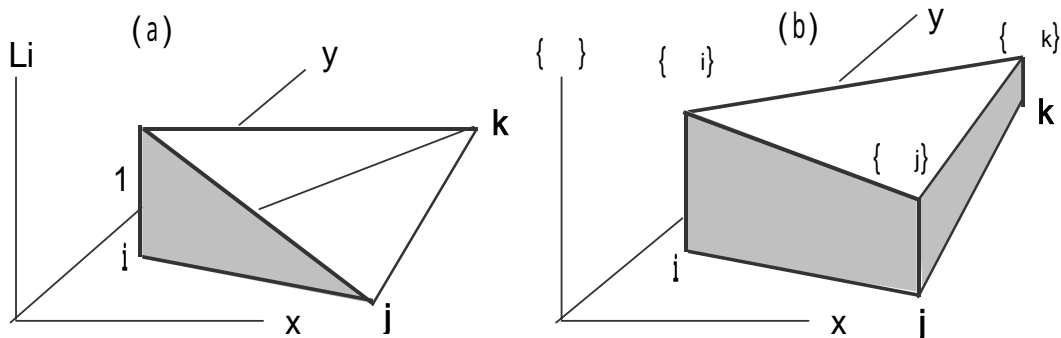


図 - 3.3 形状関数

(2) 要素の剛性方程式

力学の基本式

§ 1 のバネ系や § 2 のトラス構造の解析で、構造系の方程式 $\{ F \} = [K] \{ U \}$ の誘導に際しては、以下の 3 つの基本条件式が使われた。

$$\begin{aligned} \text{力のつり合い式} : \{ F \} &= [B]^T \{ S \} & \{ F \}: & \text{外力 (節点力)} \\ & & \{ S \}: & \text{内力 (バネ力, 部材力)} \\ \text{適合条件式} : \{ E \} &= [B] \{ U \} & \{ U \}: & \text{系の全体的な変形 (節点変位)} \\ & & \{ E \}: & \text{局所的な変形 (伸び量, ひずみ)} \\ \text{バネの構成式} : \{ S \} &= [D] \{ E \} & [D]: & \text{力と変形の関係 (バネ常数)} \end{aligned}$$

連続体の適合条件式は、物体内の 1 点のひずみ $\{ \quad \}$ と変位 $\{ u, v \}$ の関係式であり

$$\{ \quad \} = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ xy \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \{ \quad \} = [H] \{ \quad \} \quad (3.12)$$

上式に $\{ \epsilon \} = [C]^{-1} \{ U \}_e$ を用いると、離散系に関する適合条件式が下式で表される。

$$\{ \epsilon \} = [H][C]^{-1} \{ U \}_e = [B] \{ U \}_e \quad (3.13)$$

$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_k & b_k \end{bmatrix}$$

連続体のバネの方程式（構成式）は、二次元、三次元の応力～ひずみ関係を記述するフック則であり、平面応力（二次元）問題では

$$\{ \epsilon \} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & & 0 \\ & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu^2 / 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \{ \sigma \} \quad (3.14)$$

上式で $E = E/(1-\nu^2)$, $\nu = \nu/(1-\nu^2)$ と置き換えると平面ひずみ問題の $[D]$ を得る。

仮想仕事の原理 = 力のつり合い式

力学の基本式の w_e と w_i で、外部的な力 $\{ F \}$ と変形 $\{ U \}$ の内積を考えると

$$\begin{aligned} \{ F \} \text{ と } \{ U \} \text{ の内積 : } w_e &= \{ F \}^T \{ U \} \\ &= ([B]^T \{ S \})^T \{ U \} = \{ S \}^T [B] \{ U \} \\ &= \{ S \}^T \{ E \} \\ &= \text{内部的な力 } \{ S \} \text{ と変形 } \{ E \} \text{ の内積 : } w_i \end{aligned}$$

w_e は外力仕事、 w_i は内力仕事と見なせるから、上式は適合条件式を満たす変形とつり合い条件を満たす力に対して、仮想仕事の原理： $w_e = w_i$ が成り立つことを示している。換言すれば、適合条件式の仮定の下で、仮想仕事の原理は物体に働く力がつり合うための必要条件であり、つり合い条件式と同等に扱われるべき性質のものである。

二次元の応力～変形問題では（図 - 3.4）

$$\text{表面荷重 : } \{ p \} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \end{Bmatrix} \quad \text{物体力 : } \{ b \} = \begin{Bmatrix} b_x \\ b_y \end{Bmatrix}$$

の作用の下で、物体の内部には応力 $\{ \sigma \}$ が発生し、これに伴ってひずみ $\{ \epsilon \}$ が生じる。 $\{ \sigma \}$ を“内力”、 $\{ p \}$ や $\{ b \}$ を“外力”と表現すれば、外力の作用の下で内力が発生し、それらは互いにつり合っている。

『仮想仕事の原理』とは“物体内に働く力がつり合い状態にあれば、物体の仮想的微小変位に対してそれらのなす仕事の総和は0である”と表現される。つり合い

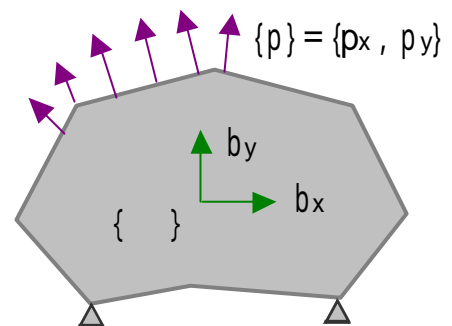


図 - 3.4 内力と外力

状態にある物体内の各点において、微小な変位 $\{d\} = \{du, dv\}^T$ と、これに伴う微小ひずみ $\{d\} = \{d_x, d_y, d_{xy}\}^T$ が生じたとすると、外力および内力のなす仕事は

$$\text{外力仕事} : w_o = \int (p_x du + p_y dv) dA + \int (b_x du + b_y dv) dV$$

$$\text{内力仕事} : w_i = \int (c_x d_x + c_y d_y + c_{xy} d_{xy}) dV$$

で表される。ただし、 dA は面積積分、 dV は体積積分である。したがって、仮想仕事の原理は $w_o = w_i$ または $w_o - w_i = 0$ となるから、行列表示して次式を得る。

$$\int \{d\}^T \{c\} dV = \int \{d\}^T \{p\} dA + \int \{d\}^T \{b\} dV \quad (3.15)$$

剛性方程式の誘導

上式の微小変位 $\{d\}$ 及び微小ひずみ $\{d\}$ は、対応する微小節点変位を $\{dU\}_e$ と置いたとき、式(3.5)の $\{d\} = [C]^{-1} \{dU\}_e$ より

$$\text{式(3.3)} : \{d\} = [A] \{d\} = [A][C]^{-1} \{dU\}_e = [N] \{dU\}_e$$

$$\text{式(3.12)} : \{d\} = [H] \{d\} = [H][C]^{-1} \{dU\}_e = [B] \{dU\}_e$$

となる。したがって、これらを式(3.15)に代入すると

$$\int \{dU\}_e^T [B]^T \{c\} dV = \int \{dU\}_e^T [N]^T \{p\} dA + \int \{dU\}_e^T [N]^T \{b\} dV$$

左辺は式(3.14)の構成式： $\{c\} = [D] \{d\} = [D][B] \{U\}_e$ を用いて、更に

$$\int \{dU\}_e^T [B]^T [D] [B] \{U\}_e dV$$

と表される。ここで、節点変位 $\{U\}_e$ (および $\{dU\}_e$) は座標 x, y に無関係であるから積分の外に出すことができ、また上式は任意の仮想微小変位について成り立たねばならないから、両辺から $\{dU\}_e$ は消去することができる。この結果、最終的に下の表現を得る。

$$[K]_e \{U\}_e = \{F\}_e \quad \sim \text{要素の剛性方程式} \quad (3.16)$$

$$[K]_e = \int [B]^T [D] [B] dV$$

$$\{F\}_e = \int [N]^T \{p\} dA + \int [N]^T \{b\} dV \quad (= \{F_p\}_e + \{F_b\}_e)$$

この $[K]_e$ および $\{F\}_e$ が要素の剛性行列および節点力ベクトルであり、 $\{F\}_e$ は更に表面荷重による項 $\{F_p\}_e$ と物体力による項 $\{F_b\}_e$ に分けられる。定ひずみ要素を仮定すると、剛性行列 $[K]_e$ の積分項 $[B]^T [D] [B]$ は要素内で一定値であり、変数 x, y を含まないから、要素の体積、面積、厚さを各々 V, A, t と置くと $[K]_e$ は次式で与えられる。

$$[K]_e = [B]^T [D] [B] \cdot V = [B]^T [D] [B] \cdot At \quad (3.17)$$

全系の方程式はトラスの構造解析と同様な方法で要素の方程式を加え合わせて得られる。全節点数を N_p とすると $[K]$ は $2N_p \times 2N_p$ の対称行列になる。

表面分布荷重 $\{p\} = \{p_x, p_y\}^T$ の導入

$\{p\}$ による節点力ベクトルは式(3.16)より

$$\begin{aligned} \{F_p\}_e &= \int [N]^T \{p\} dA \\ &= ([C]^{-1})^T \int [A]^T \{p\} dA \end{aligned} \quad (3.18)$$

で与えられる。 dA は面積積分であるが、二次元問題では物体表面に沿う線積分になる。しかし、実際にはこの積分を行うことなく、単純ばりの計算によって分布荷重を境界節点に働く等価な集中荷重に置き換えて表面荷重の効果を取り入れることができる(図-3.5)。すなわち、各境界節点が関係する範囲の荷重を集中荷重に置換えて分割配分する。

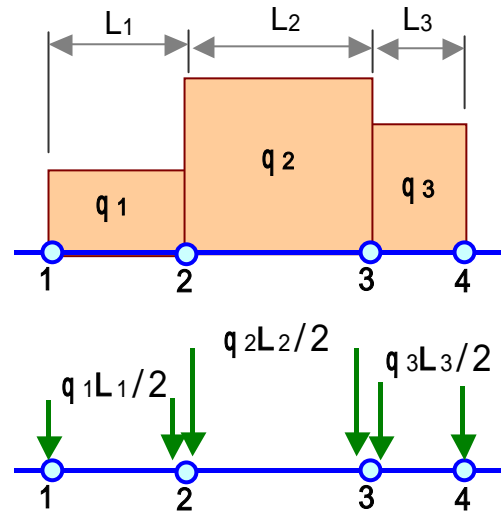


図 - 3.5 表面荷重の処理

物体力 $\{b\} = \{b_x, b_y\}^T$ の導入

$\{b\}$ による節点力ベクトルも上と同形で表され(体積積分 dV である点が異なる)

$$\{F_b\}_e = \int [N]^T \{b\} dV = ([C]^{-1})^T \int [A]^T \{b\} dV$$

b_x, b_y を要素内で一定値とし、座標原点を要素の重心にとって積分を実行すると

$$\{F_b\}_e = ([C]^{-1})^T \int \int t \begin{Bmatrix} b_x \\ b_x x \\ b_x y \\ b_y \\ b_y x \\ b_y y \end{Bmatrix} dx dy = ([C]^{-1})^T \begin{Bmatrix} b_x At \\ 0 \\ 0 \\ b_y At \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \frac{At}{3} \begin{Bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_x \\ b_y \\ b_x \\ b_y \end{Bmatrix} \quad (3.19)$$

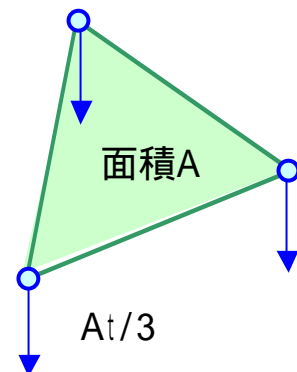
構造物の自重による応力・変形問題では、 $b_x = 0, b_y = -$ であるから、上式によれば要素の重量(At)を3等分したものが y 方向の節点荷重として3つの節点に分配されると考えればよい。

要素内応力・ひずみの計算

方程式の解として節点変位 $\{U\}_e$ を得たのちは、式(3.13)より要素内のひずみ $\{\epsilon\}$ 式(3.14)より要素内の応力 $\{\sigma\}$ が定まる。

$$\begin{aligned} \{\epsilon\} &= [H][C]^{-1}\{U\}_e = [B]\{U\}_e \\ \{\sigma\} &= [D]\{\epsilon\} = [D][B]\{U\}_e \end{aligned} \quad (3.20)$$

変位関数に x, y の一次式を仮定すると、応力・ひずみは要素内で一定値をとる。



(3) 計算の実行

解析上の留意点

半無限地盤の表面に一様分布荷重 p_0 (幅 B) が作用する時の地盤内の応力・変形問題を考える(図 - 3.6)。この問題では地盤が無限の広がりをもっているから、まず(a)図のように解析領域 (H, L) の大きさを設定する必要がある。 H, L を小さくとると領域境界の拘束の影響が応力・変形解に現れるし、大きくとり過ぎると要素数を多くしなければならない面がある。適当な値は試行計算を行って決定するしかないが、通常は $L/B > 10, H/B > 5$ 程度を考えればよい。

次に、この問題は対称形であるから、(b)図のように半断面だけを解析領域とすればよいことが分かる。このとき対称軸の条件は、軸に沿うせん断応力 $= 0$ であるから、 x 方向に拘束、 y 方向に自由のロ - ラ - 支持を考えればよい。また、この種の問題では表面荷重付近で応力が急激に変化するので、その変化を精度良く表現するために要素分割を細かくする必要がある。

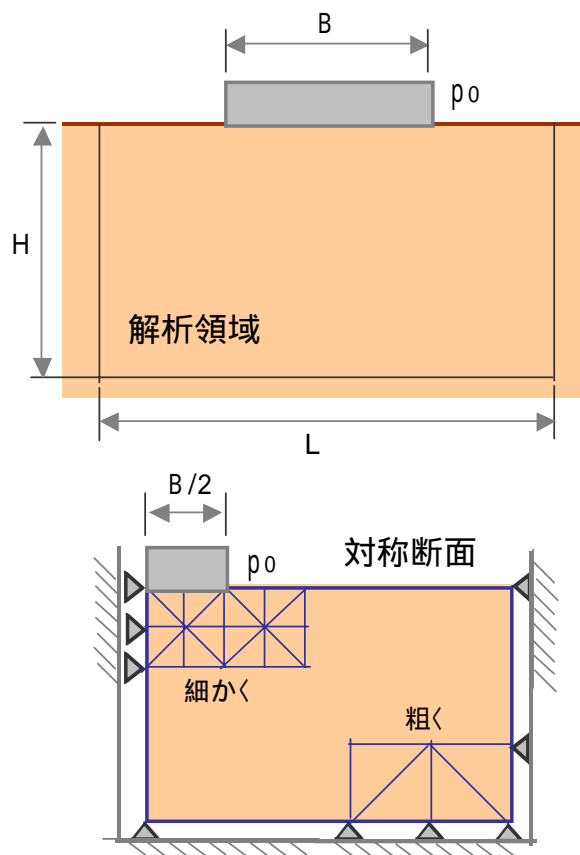


図 - 3.6 計算上の注意

FEMプログラム

(三角形・定ひずみ要素 / 弾性解析 / 表面荷重 & 自重)

```

C *****
C *
C *   ## feplane.for   ##           2000 / Jan
C *
C *   Two-dimensional Elastic Stress-Deformation Analysis
C *   * Constant Strain Triangular Element
C *
C *   INPUT = 55
C *   OUTPUT = 6 (print)
C *   OUTPUT = 56 (Displacement)
C *   OUTPUT = 57 (Stress & Strain)
C *
C *****
    
```



```

C=====
C  MAIN PROGRAM
C=====
C
character*48 fname0,fname55,fname6,fname56,fname57
write(*,'(A)') '***** two-dimensional elastic analysis *****'
write(*,'(A)') '      (feplane.for) triangular elemwnt'
write(*,'(A)') '      Input data file ==>> ./data/test.txt'
  read (*,'(A)') fname0
  open(1,file=fname0)
  read(1,*) fname55,fname6,fname56,fname57          入出力ファイル名の読み込み
close(1)

C
  open(55,file=fname55)
  open( 6,file=fname6)          入出力ファイルの open
  open(56,file=fname56)
  open(57,file=fname57)

C
CALL INPUT          ... デ - タ入力
CALL EBMAT          ... 行列 [ B ] の作成 (プログラムでは [ EB ])
CALL DMAMAT         ... 弾性行列 [ D ] の作成 (プログラムでは [ DMA ])
CALL STIFF          ... 剛性行列 [ K ] の作成 (プログラムでは [ ST ])
CALL PLOAD          ... 荷重ベクトル { P } の作成
CALL DISPL          ... 境界条件の導入 / 連立一次方程式の計算
CALL STRESS         ... 応力・ひずみの計算

C
close(55)
close(6)          入出力ファイルの close
close(56)
close(57)

C
STOP
END

C
SUBROUTINE INPUT
C=====
C  READING AND PRINTING OF INPUT DATA          ... デ - タ入出力
C=====
C  1 NELEM    ** TOTAL NUMBER OF ELEMENTS          ... 要素数
C  NPOIN     ** TOTAL NUMBER OF NODAL POINTS      ... 節点数
C  NBLK      ** NUMBER OF BLOCKS                  ... 材質ブロック数
C  NPLANE    ** NPLANE=1 ... PLANE STRAIN          ... 平面ひずみ / 平面応力
C             NPLANE=2 ... PLANE STRESS
C  NLOAD     ** NLOAD=1 .... BODY FORCE ONLY        ... 荷重条件
C             NLOAD=2 .... SURFACE LOAD ONLY      * 自重と表面荷重
C             NLOAD=3 .... BODY FORCE AND SURFACE LOAD
C  2 NOD(J,I) ** THREE NODAL POINT NUMBERS OF ELEMENT ... 要素を囲む 3 節点
C  3 XY(J,I)  ** X,Y-COORDINATES OF NODAL POINT   ... 節点の x y 座標
C  4 KODE(I)  ** KODE(1)=0 .. X,Y-FREE            ... 変位の境界条件
C             KODE(1)=1 .. X-FIX AND Y-FREE
C             KODE(1)=2 .. X-FREE AND Y-FIX
C             KODE(1)=3 .. X,Y-FIX
C  5 NEB(I)   ** BLOCK NUMBER OF ELEMENT          ... 要素の材質番号
C  6 DIMX,DIMY * MULTIPLIER OF X,Y-COORDINATES    ... x y 座標倍率
C  7 BELA(K)  ** YOUNG'S MODULUS OF EACH BLOCK    ... ヤング率 E (材質ごと)

```

```

C      BYNT(K)  ** POISSON'S RATIO OF EACH BLOCK          ポアソン比
C      BGAM(K)  ** UNIT WEIGHT      OF EACH BLOCK          単位体積重量
C      ..... FOR SURFACE LOAD (NLOAD.GE.2) .....
C      8 NTPL   ** TOTAL NUMBER OF NODAL POINTS ON SURFACE LOAD ... 表面荷重の作用点数
C      9 NPL(K) ** NUMBER OF NODAL POINT ON SURFACE LOAD     荷重作用点の番号
C      10 PXY(K,J) ** X,Y-SURFACE LOAD                       x y の荷重値
C
C      PARAMETER (NEO=1500,NPO=1000,NQO=2000)
C      COMMON /BL1/ NELEM,NPOIN,NEQ,NB,NBLK,NPLANE,NLOAD
C      COMMON /BL2/ NOD(3,NEO),XY(2,NPO),NEB(NEO),KODE(NPO)
C      COMMON /BL3/ EB(6,NEO),DMA(3,NEO),AREA(NEO)
C      COMMON /BL4/ U(NPO),V(NPO),EPP(3,NEO),SSS(3,NEO)
C      COMMON /BL5/ BELA(9),BYNT(9),BGAM(9)
C      COMMON /BL6/ NTPL,NPL(30),PXY(30,2)
C
C      READ(55,*) NELEM,NPOIN,NBLK,NPLANE,NLOAD          ... 自由書式デ - タ入力
C      READ(55,*) (N,(NOD(J,I),J=1,3),I=1,NELEM)
C      READ(55,*) (N,XY(1,I),XY(2,I),I=1,NPOIN)          ... NOD は反時計回りに読む
C      READ(55,*) (KODE(I),I=1,NPOIN)
C      READ(55,*) (NEB(I),I=1,NELEM)
C      READ(55,*) DIMX,DIMY
C      DO 1 I=1,NBLK
C      1 READ(55,*) BELA(I),BYNT(I),BGAM(I)                ... 単位を統一すること
C      IF(NLOAD.LT.2) GO TO 5                               ( kN-cm )
C      READ(55,*) NTPL
C      READ(55,*) (NPL(I),I=1,NTPL)
C      READ(55,*) (PXY(I,1),PXY(I,2),I=1,NTPL)
C      5 CONTINUE
C
C      BAND WIDTH *** NB          ... バンド幅 (NB) の決定
C
C      NB=0
C      DO 20 I=1,NELEM
C      DO 20 J=1,3
C      J1=J+1
C      IF(J1.EQ.4) J1=1
C      NODD=ABS(NOD(J,I)-NOD(J1,I))
C      IF (NODD.GT.NB) NB=NODD
C      20 CONTINUE
C      NB=2*(NB+1)
C
C      WRITE(6,2000) NB
C      WRITE(6,2010) NELEM,NPOIN,NBLK,NPLANE,NLOAD        ... 入力デ - タの出力
C      WRITE(6,2020) (I,NEB(I),(NOD(J,I),J=1,3),I=1,NELEM)
C      WRITE(6,2030) (I,KODE(I),XY(1,I),XY(2,I),I=1,NPOIN)
C      WRITE(6,2040) DIMX,DIMY
C      DO 2 I=1,NBLK
C      2 WRITE(6,2050) I,BELA(I),BYNT(I),BGAM(I)
C      IF(NLOAD.LT.2) GO TO 6
C      WRITE(6,2060) (NPL(I),PXY(I,1),PXY(I,2),I=1,NTPL)
C      6 CONTINUE
C
C      2000 FORMAT(1H ,40('*')/1H , '*** INPUT DATA ***',
C      *      ' ..... NB =',I3/1H ,40('*'))
C      2010 FORMAT(/1H , 'NELEM * NPOIN * NBLK * NPLANE * NLOAD'

```

```

*      //1H ,15,18,17,19,18)
2020 FORMAT(/1H , 'ELEMENT *** NEB *** THREE NODES' //
*      1H ,2(' NO. BLOCK I J K ',3X)
*      /(1H ,2(14,16,315,5X)))
2030 FORMAT(/1H , 'POINT *** KODE *** COORDINATES(X,Y)'
*      //1H ,2(' NO. KODE X Y ',5X)
*      /(1H ,2(14,15,2F9.2,5X)))
2040 FORMAT(/1H , 'DIMX * DIMY ***'//1H ,2F10.2
*      //1H , 'BLOCK DATA ***' /)
2050 FORMAT( 1H ,2X, 'BLK' ,13,5X, 'BELA=' ,F10.3,5X, 'BYNT=' ,F7.3,
*      5X, 'BGAM=' ,F10.4)
2060 FORMAT(/1H , 'SURFACE LOAD ***' /1H ,/(1H ,2X, 'NP.' ,15,5X,
*      'PX=' ,F10.3,5X, 'PY=' ,F10.3))

```

C

```

NEQ=2*NPOIN
DO 10 I=1,NPOIN
XY(1,I)=XY(1,I)*DIMX
10 XY(2,I)=XY(2,I)*DIMY
DO 12 I=1,NELEM
DO 12 J=1,3
SSS(J,I)=0.0
12 EPP(J,I)=0.0
DO 14 I=1,NPOIN
U(I)=0.0
14 V(I)=0.0

```

... 初期値の設定
変数のゼロクリア

C

```

RETURN
END

```

C

```

SUBROUTINE EBMAT

```

```

C=====

```

```

C FORM EB-MATRIX

```

... 行列 [B] の作成

```

C=====

```

```

PARAMETER (NEO=1500,NPO=1000,NQO=2000)
COMMON /BL1/ NELEM,NPOIN,NEQ,NB,NBLK,NPLANE,NLOAD
COMMON /BL2/ NOD(3,NEO),XY(2,NPO),NEB(NEO),KODE(NPO)
COMMON /BL3/ EB(6,NEO),DMA(3,NEO),AREA(NEO)
DIMENSION XI(3),YI(3)

```

C

```

DO 20 N=1,NELEM
DO 21 I=1,3
JJ=NOD(I,N)
XI(I)=XY(1,JJ)
21 YI(I)=XY(2,JJ)
B1=YI(2)-YI(3)
B2=YI(3)-YI(1)
B3=YI(1)-YI(2)
C1=XI(3)-XI(2)
C2=XI(1)-XI(3)
C3=XI(2)-XI(1)
AA=(C1*YI(1)+C2*YI(2)+C3*YI(3))*0.5
AREA(N)=AA
A2=1.0/(2.0*AA)
EB(1,N)=B1*A2
EB(2,N)=B2*A2

```

... AREA(N) = 三角形要素
の面積

```

        EB(3,N)=B3*A2
        EB(4,N)=C1*A2
        EB(5,N)=C2*A2
        EB(6,N)=C3*A2
20 CONTINUE
C
    RETURN
    END
C
    SUBROUTINE DMAMAT
C=====
C    FORM DMA-MATRIX
C=====
        PARAMETER (NEO=1500,NPO=1000,NQO=2000)
        COMMON /BL1/ NELEM,NPOIN,NEQ,NB,NBLK,NPLANE,NLOAD
        COMMON /BL2/ NOD(3,NEO),XY(2,NPO),NEB(NEO),KODE(NPO)
        COMMON /BL3/ EB(6,NEO),DMA(3,NEO),AREA(NEO)
        COMMON /BL5/ BELA(9),BYNT(9),BGAM(9)
        DIMENSION BDMA(9,3)
C
        DO 40 I=1,NBLK
            EE=BELA(I)
            YN=BYNT(I)
            YN1=1.0+YN
            YN2=1.0-YN
            YN3=1.0-2.0*YN
            IF(NPLANE.EQ.1) GO TO 10
            YN4=YN1*YN2
            BDMA(I,1)=EE/YN4
            BDMA(I,2)=EE*YN/YN4
            GO TO 15
10 YN4=YN1*YN3
            BDMA(I,1)=EE*YN2/YN4
            BDMA(I,2)=EE*YN/YN4
15 BDMA(I,3)=EE/(2.0*YN1)
40 CONTINUE
C
        DO 50 N=1,NELEM
            NBL=NEB(N)
            DO 60 J=1,3
20 DMA(J,N)=BDMA(NBL,J)
60 CONTINUE
C
    RETURN
    END
C
    SUBROUTINE STIFF
C=====
C    FORM STIFFNESS MATRIX (ST)
C=====
        PARAMETER (NEO=1500,NPO=1000,NQO=2000)
        COMMON /BL1/ NELEM,NPOIN,NEQ,NB,NBLK,NPLANE,NLOAD
        COMMON /BL2/ NOD(3,NEO),XY(2,NPO),NEB(NEO),KODE(NPO)
        COMMON /BL3/ EB(6,NEO),DMA(3,NEO),AREA(NEO)
        COMMON /BL8/ ST(NQO,200),P(NQO)

```

... 弾性行列 [D] の作成

... 材質毎の弾性係数
(BDMA)

... 要素毎の弾性係数
(DMA)

... 要素剛性行列の作成
全体剛性行列への組込

```

DIMENSION D(3,3),BA(3,6),DBA(3,6),C(6,6),LM(6)
C
DO 10 I=1,NB
DO 10 J=1,NEQ
10 ST(J,I)=0.0
DO 1 I=1,3
DO 2 K=1,3
2 D(I,K)=0.0
DO 1 J=1,6
1 BA(I,J)=0.0
C
DO 100 N=1,NELEM
AA=AREA(N)
BA(1,1)=EB(1,N)
BA(1,3)=EB(2,N)
BA(1,5)=EB(3,N)
BA(2,2)=EB(4,N)
BA(2,4)=EB(5,N)
BA(2,6)=EB(6,N)
BA(3,1)=BA(2,2)
BA(3,3)=BA(2,4)
BA(3,5)=BA(2,6)
BA(3,2)=BA(1,1)
BA(3,4)=BA(1,3)
BA(3,6)=BA(1,5)
D(1,1)=DMA(1,N)
D(1,2)=DMA(2,N)
D(3,3)=DMA(3,N)
D(2,1)=D(1,2)
D(2,2)=D(1,1)
DO 3 I=1,3
DO 3 J=1,6
DBA(I,J)=0.0
DO 3 K=1,3
DBA(I,J)=DBA(I,J)+D(I,K)*BA(K,J)
3 CONTINUE
DO 4 I=1,6
DO 4 J=1,6
C(I,J)=0.0
DO 4 K=1,3
C(I,J)=C(I,J)+BA(K,I)*DBA(K,J)*AA
4 CONTINUE
C
LM(2)=2*NOD(1,N)
LM(1)=LM(2)-1
LM(4)=2*NOD(2,N)
LM(3)=LM(4)-1
LM(6)=2*NOD(3,N)
LM(5)=LM(6)-1
DO 200 I=1,6
DO 200 J=1,6

II=LM(1)
JJ=LM(J)
IF(II-JJ) 210,210,200

```

... [BA] = [B]
... 弾性行列 [D]
... [DBA] = [D][B]
... 要素剛性行列
[C] = [B]^T [D] [B] A
... 要素剛性行列と全体剛性行列の位置関係
... 全体行列 [K] = [ST]
への組込み
[K] が対称かつ帯行列であることを利用

```

210 IJ=JJ-11+1
      ST(11,IJ)=ST(11,IJ)+C(I,J)
200 CONTINUE
100 CONTINUE
C
      RETURN
      END
C
      SUBROUTINE PLOAD
C=====
C      FORM LOAD VECTOR (P)
C=====
      PARAMETER (NEO=1500,NPO=1000,NQO=2000)
      COMMON /BL1/ NELEM,NPOIN,NEQ,NB,NBLK,NPLANE,NLOAD
      COMMON /BL2/ NOD(3,NEO),XY(2,NPO),NEB(NEO),KODE(NPO)
      COMMON /BL3/ EB(6,NEO),DMA(3,NEO),AREA(NEO)
      COMMON /BL5/ BELA(9),BYNT(9),BGAM(9)
      COMMON /BL6/ NTPL,NPL(30),PXY(30,2)
      COMMON /BL8/ ST(NQO,200),P(NQO)
C
      DO 300 I=1,NEQ
300 P(I)=0.0
      IF(NLOAD.EQ.2) GO TO 310
C
C      BODY FORCE
C
      DO 100 N=1,NELEM
      NBL=NEB(N)
      WW=BGAM(NBL)*AREA(N)/3.0
      DO 110 I=1,3
      JJ=2*NOD(I,N)
      110 P(JJ)=P(JJ)+WW
100 CONTINUE
      IF(NLOAD.EQ.1) RETURN
310 CONTINUE
C
C      SURFACE LOAD
C
      DO 200 I=1,NTPL
      NN=2*NPL(I)
      P(NN-1)=P(NN-1)+PXY(I,1)
200 P(NN)=P(NN)+PXY(I,2)
C
      RETURN
      END
C
      SUBROUTINE DISPL
C=====
C      BOUNDARY CONDITIONS AND SOLVE EQUATION
C=====
      PARAMETER (NEO=1500,NPO=1000,NQO=2000)
      COMMON /BL1/ NELEM,NPOIN,NEQ,NB,NBLK,NPLANE,NLOAD
      COMMON /BL2/ NOD(3,NEO),XY(2,NPO),NEB(NEO),KODE(NPO)
      COMMON /BL4/ U(NPO),V(NPO),EPP(3,NEO),SSS(3,NEO)
      COMMON /BL8/ ST(NQO,200),P(NQO)

```

... 荷重ベクトル{P}の作成

... 自重項

... y方向の荷重成分として
A/3 ずつ分配

... 表面荷重項

... データ入力した PXY
を x y 方向に加算

... 変位の境界条件の導入

```

C
C   BOUNDARY CONDITION
C
      DO 500 N=1,NPOIN
      KO=KODE(N)
      NN=2*N
      IF(KO-1) 500,150,125
125  IF(KO-3) 250,150,500
150  NNI=NN-1
      UV=U(N)
      GO TO 200
250  KO=KO-1
      NNI=NN
      UV=V(N)
200  IF(NNI.GE.NB) GO TO 355
      M=NNI
      GO TO 360
355  M=NB
360  DO 400 II=1,M
      K=NNI-(II-1)
      P(K)=P(K)-ST(K,II)*UV
400  ST(K,II)=0.0
      DO 425 II=2,NB
      K=NNI+(II-1)
      IF(K-NEQ) 450,450,425
450  P(K)=P(K)-ST(NNI,II)*UV
425  ST(NNI,II)=0.0
      ST(NNI,1)=1.0
      P(NNI)=UV
      IF(KO.EQ.3) GO TO 250
500  CONTINUE
C
C   SOLVE EQUATION
C
      CALL SYMEQ (ST,P,NEQ,NB)
C
      DO 600 N=1,NPOIN
      NN=2*N
      U(N)=U(N)+P(NN-1)
600  V(N)=V(N)+P(NN )
      WRITE(6,3000) (I,U(I),V(I),I=1,NPOIN)
      WRITE(56,*) (I,U(I),V(I),I=1,NPOIN)
3000 FORMAT(//1H , '***** DISPLACEMENTS *****'
1      //1H ,2('POINT',5X,'U(CM)',8X,'V(CM)',2X,'* ')
2      /(1H ,2(I4,2X,1PE10.3,' ', ', ',1PE10.3,' * ')))
C
      RETURN
      END
C
      SUBROUTINE STRESS
C=====
C   CALCULATION OF STRESS AND STRAIN
C=====
      PARAMETER (NEQ=1500,NPO=1000,NQO=2000)
      COMMON /BL1/ NELEM,NPOIN,NEQ,NB,NBLK,NPLANE,NLOAD

```

... [K]が対称かつ帯行列
である特性を考慮

... 対称・帯行列の[K]の
連立一次方程式を解く
(GAUSS の消去法)

... 変位値 U , V

... 変位の出力 (印刷出力)
... 変位の出力 (ファイル出力)

... 応力・ひずみ計算

```

COMMON /BL2/ NOD(3,NEO),XY(2,NPO),NEB(NEO),KODE(NPO)
COMMON /BL3/ EB(6,NEO),DMA(3,NEO),AREA(NEO)
COMMON /BL4/ U(NPO),V(NPO),EPP(3,NEO),SSS(3,NEO)
COMMON /BL8/ ST(NQO,200),P(NQO)
DIMENSION DIS(6),EPS(3),STS(3)

C
PEI=3.141593
WRITE(6,4000)
4000 FORMAT(///1H,'STRESS AND STRAIN *****'//)
DO 700 N=1,NELEM
DO 710 I=1,3
II=2*I
JJ=2*NOD(I,N)
DIS(II-1)=P(JJ-1)
710 DIS(II)=P(JJ)
EPS(1)=EB(1,N)*DIS(1)+EB(2,N)*DIS(3)+EB(3,N)*DIS(5) ... { } = [ B ] { U } e
EPS(2)=EB(4,N)*DIS(2)+EB(5,N)*DIS(4)+EB(6,N)*DIS(6)
EPS(3)=EB(1,N)*DIS(2)+EB(2,N)*DIS(4)+EB(3,N)*DIS(6)
1+EB(4,N)*DIS(1)+EB(5,N)*DIS(3)+EB(6,N)*DIS(5)
STS(1)=DMA(1,N)*EPS(1)+DMA(2,N)*EPS(2) ... { } = [ D ] { }
STS(2)=DMA(2,N)*EPS(1)+DMA(1,N)*EPS(2)
STS(3)=DMA(3,N)*EPS(3)
DO 720 I=1,3
SSS(I,N)=SSS(I,N)+STS(I)
720 EPP(I,N)=EPP(I,N)+EPS(I)
DO 730 I=1,3
STS(I)=SSS(I,N)
730 EPS(I)=EPP(I,N)

C
CALL PRNCPL (PEI,STS(1),STS(2),STS(3), ST1,ST2,ALPHA,TMX) ... 主応力の計算
CALL PRNCPL (PEI,EPS(1),EPS(2),EPS(3)*.5,EP1,EP2,ALEPS,GMX) ... 主ひずみの計算
GMX=2.0*GMX ... m a x = GMX

C
WRITE(6,4001) N,TMX,GMX
WRITE(6,4002) (STS(I),I=1,3),ST1,ST2,ALPHA
WRITE(6,4003) (EPS(I),I=1,3),EP1,EP2,ALEPS
WRITE(57,*) N,(STS(I),I=1,3),(EPS(I),I=1,3),GMX ... 応力・ひずみ値のファイル出力
4001 FORMAT(1H,'ELEM',I5,12X,'TAU=',E14.5,3X,'EPG=',E14.5)
4002 FORMAT(1H,'STX=',E14.6,3X,'STY=',E14.6,3X,'TXY=',E14.6,5X,'ST1=',
*E14.6,3X,'ST2=',E14.6,5X,'ALPHA=',F6.2)
4003 FORMAT(1H,'EPX=',E14.6,3X,'EPY=',E14.6,3X,'EXY=',E14.6,5X,'EP1=',
*E14.6,3X,'EP2=',E14.6,5X,'ALEPS=',F6.2)
700 CONTINUE

C
RETURN
END
SUBROUTINE PRNCPL (PEI,S1,S2,S3,P1,P2,AN,XM) ... 主応力・主ひずみの計算
SUM=(S1+S2)*0.5
DIF=S1-S2
DD=DIF*DIF+4.0*S3*S3
XM=SQRT(DD)*0.5
P1=SUM+XM
P2=SUM-XM
AN=PEI*0.25
IF(DIF.NE.0.0) ANG=0.5*ATAN(2.0*S3/DIF)

```



```

        IF(S1.LT.S2)  ANG=ANG+PEI*0.5
        AN=ANG*180.0/PEI
        RETURN
        END
C
        SUBROUTINE SYMEQ (ST,P,NEQ,NB)
C*****
C        SOLVE SYMMETRIC EQUATION          ... GAUSS の消去法
C*****
        PARAMETER (NEQ=1500,NP0=1000,NQ0=2000)
        DIMENSION ST(NQ0,200),P(NQ0),SST(200)
        L=0
        MNB=NB
        DO 1 N=1,NEQ          ... 前進消去
        ST1=ST(N,1)
        IF(ST1.EQ.0.0) GO TO 1
        P(N)=P(N)/ST1
        NNEQ=N-NEQ
        IF(NNEQ) 15,20,15
15 IF(NB.GE.(1-NNEQ)) MNB=1-NNEQ
        DO 2 I=1,NB
        2 SST(I)=ST(N,I)
        DO 3 J=2,MNB
        IF(ST(N,J)) 35,3,35
35 ST(N,J)=ST(N,J)/ST1
        JJ=N+J-1
        NNB=MNB-J+1
        DO 4 I=1,NNB
        IN=I+J-1
        4 ST(JJ,I)=ST(JJ,I)-SST(IN)*ST(N,J)
        P(JJ)=P(JJ)-SST(J)*P(N)
        3 CONTINUE
        1 CONTINUE
C
        20 NNB=NB-1          ... 後退代入
        L=L+1
        N=N-1
        IF(N) 50,50,55
        55 IF(L-NNB) 60,60,65
        60 LB=L
        GO TO 70
        65 LB=NNB
        70 DO 8 J=1,LB
        JJ=N+J
        8 P(N)=P(N)-ST(N,J+1)*P(JJ)
        GO TO 20
C
        50 RETURN
        END

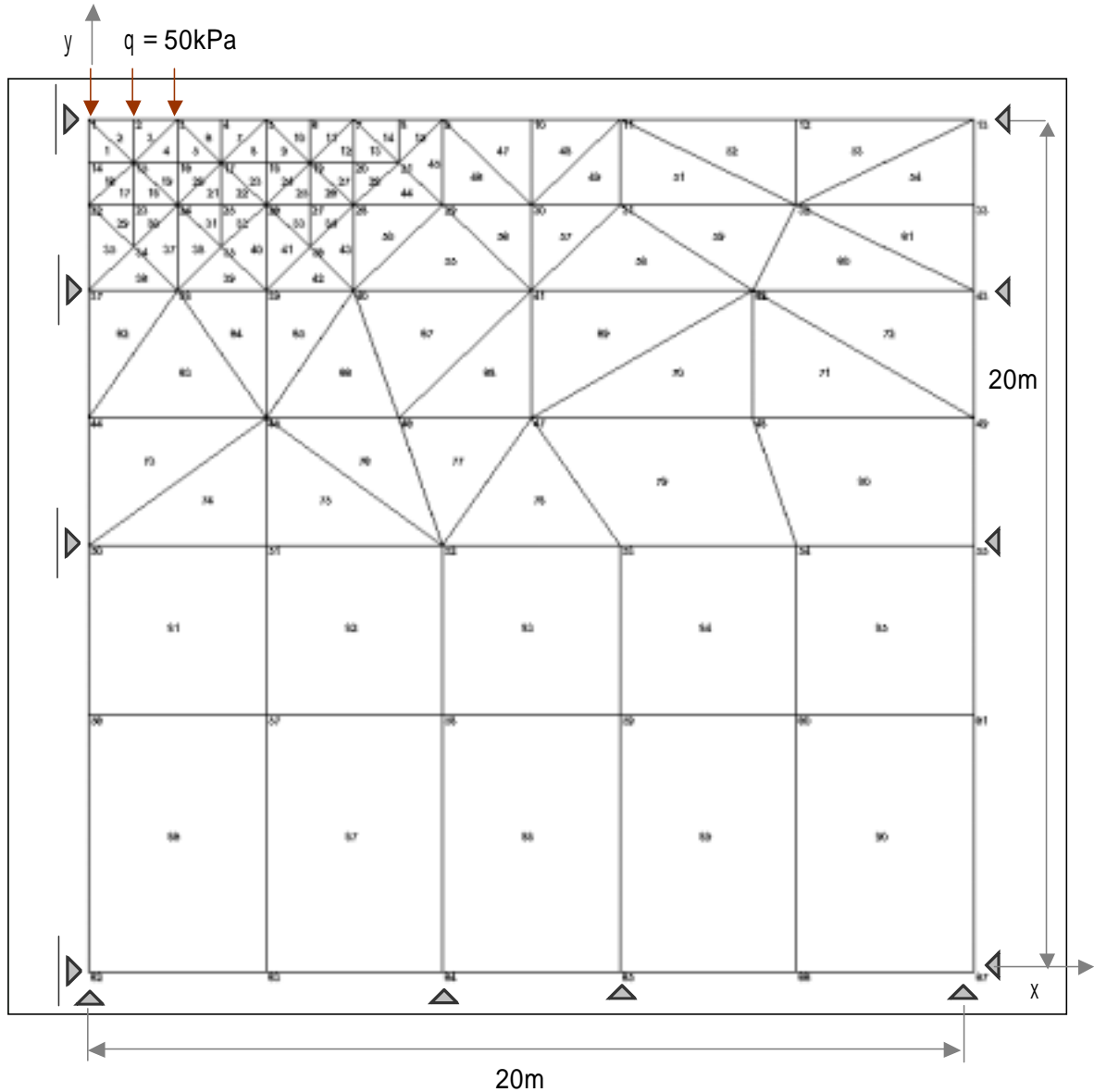
```

計算例：半無限地盤上の一様載荷に対する地表面変位と地盤内の応力解を求める。

地盤材料： $E = 20,000 \text{ kN/m}^2 = 20\text{MPa}$, $\nu = 0.3$, $\alpha = 0.0$

表面荷重： $q = 50\text{kN/m}^2 = 50\text{kPa}$

* なお、この計算は四角形定ひずみ要素弾性解析プログラム (fqplane.for) で行う。



有限要素分割

* 用意するデ - タファイル：strip4.txt (入出力ファイル名デ - タ)

- './data/strip4.dat' 入力デ - タ
- './data/strip4.lst' 変位・応力解の印刷出力用
- './data/strip4dis.dat' 変位解のファイル出力用
- './data/strip4str.dat' 応力解のファイル出力用

入力デ - タ (strip4.dat)

このデ - タは四角形要素用プログラム (fqplane.for) 用に作成したものである。三角形要素に対しては、NOD の読み込みで、3,4 番面の節点値を同一にすることで四角形と区別する。

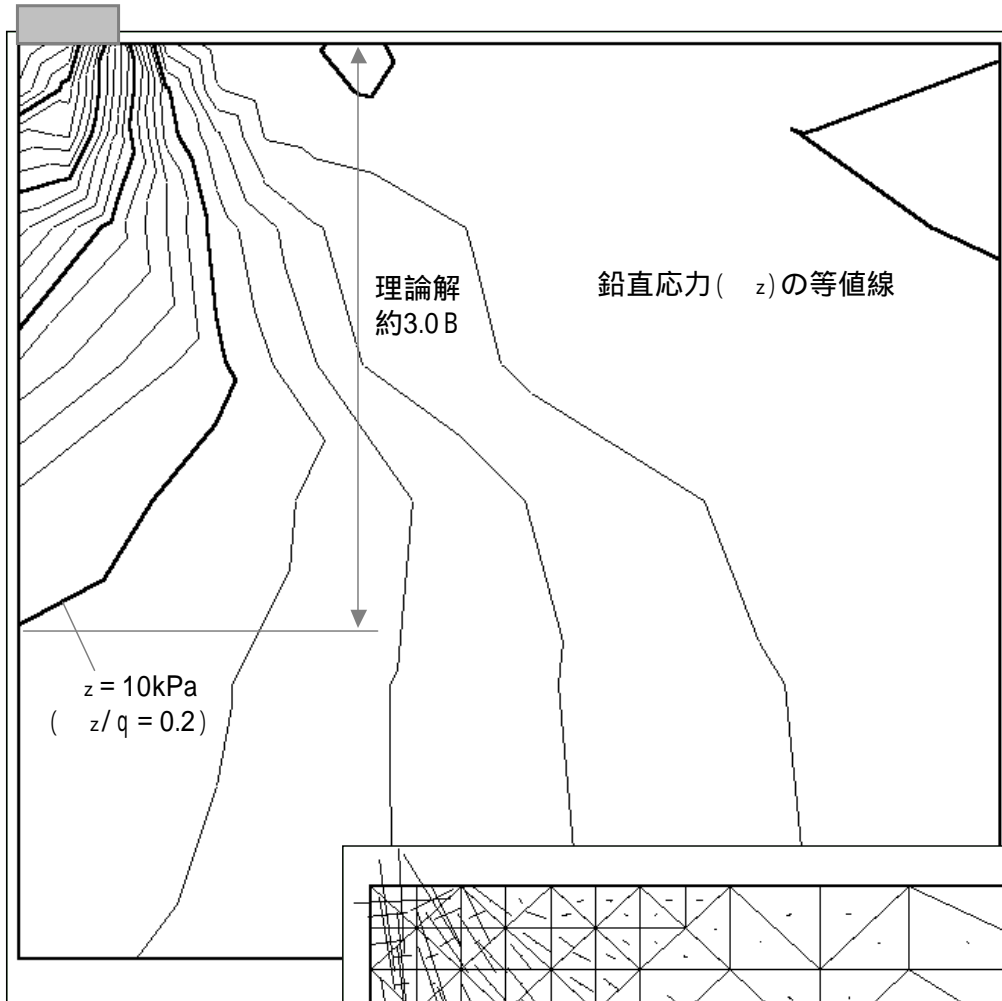
```

90 67 1 1 2
 1 1 14 15 15 2 1 15 2 2 3 2 15 3 3 4 3 15 16 16
 5 3 16 17 17 6 3 17 4 4 7 4 17 5 5 8 5 17 18 18
 9 5 18 19 19 10 5 19 6 6 11 6 19 7 7 12 7 19 20 20
13 7 20 21 21 14 7 21 8 8 15 8 21 9 9 16 14 22 15 15
17 15 22 23 23 18 15 23 24 24 19 15 24 16 16 20 16 24 17 17
21 17 24 25 25 22 17 25 26 26 23 17 26 18 18 24 18 26 19 19
25 19 26 27 27 26 19 27 28 28 27 19 28 20 20 28 20 28 21 21
29 22 34 23 23 30 23 34 24 24 31 24 35 25 25 32 25 35 26 26
33 26 36 27 27 34 27 36 28 28 35 22 37 34 34 36 34 37 38 38
37 24 34 38 38 38 24 38 35 35 39 35 38 39 39 40 26 35 39 39
41 26 39 36 36 42 36 39 40 40 43 28 36 40 40 44 21 28 29 29
45 9 21 29 29 46 9 29 30 30 47 9 30 10 10 48 10 30 11 11
49 11 30 31 31 50 28 40 29 29 51 11 31 32 32 52 11 32 12 12
53 12 32 13 13 54 13 32 33 33 55 29 40 41 41 56 29 41 30 30
57 30 41 31 31 58 31 41 42 42 59 31 42 32 32 60 32 42 43 43
61 32 43 33 33 62 37 44 38 38 63 38 44 45 45 64 38 45 39 39
65 39 45 40 40 66 40 45 46 46 67 40 46 41 41 68 41 46 47 47
69 41 47 42 42 70 42 47 48 48 71 42 48 49 49 72 42 49 43 43
73 44 50 45 45 74 45 50 51 51 75 45 51 52 52 76 45 52 46 46
77 46 52 47 47 78 47 52 53 53 79 47 53 54 48 80 48 54 55 49
81 50 56 57 51 82 51 57 58 52 83 52 58 59 53 84 53 59 60 54
85 54 60 61 55 86 56 62 63 57 87 57 63 64 58 88 58 64 65 59
89 59 65 66 60 90 60 66 67 61
 1 0.0 20.0 2 1.0 20.0 3 2.0 20.0 4 3.0 20.0
 5 4.0 20.0 6 5.0 20.0 7 6.0 20.0 8 7.0 20.0
 9 8.0 20.0 10 10.0 20.0 11 12.0 20.0 12 16.0 20.0
13 20.0 20.0 14 0.0 19.0 15 1.0 19.0 16 2.0 19.0
17 3.0 19.0 18 4.0 19.0 19 5.0 19.0 20 6.0 19.0
21 7.0 19.0 22 0.0 18.0 23 1.0 18.0 24 2.0 18.0
25 3.0 18.0 26 4.0 18.0 27 5.0 18.0 28 6.0 18.0
29 8.0 18.0 30 10.0 18.0 31 12.0 18.0 32 16.0 18.0
33 20.0 18.0 34 1.0 17.0 35 3.0 17.0 36 5.0 17.0
37 0.0 16.0 38 2.0 16.0 39 4.0 16.0 40 6.0 16.0
41 10.0 16.0 42 15.0 16.0 43 20.0 16.0 44 0.0 13.0
45 4.0 13.0 46 7.0 13.0 47 10.0 13.0 48 15.0 13.0
49 20.0 13.0 50 0.0 10.0 51 4.0 10.0 52 8.0 10.0
53 12.0 10.0 54 16.0 10.0 55 20.0 10.0 56 0.0 6.0
57 4.0 6.0 58 8.0 6.0 59 12.0 6.0 60 16.0 6.0
61 20.0 6.0 62 0.0 0.0 63 4.0 0.0 64 8.0 0.0
65 12.0 0.0 66 16.0 0.0 67 20.0 0.0
1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 3 0 0 0 1 0 0 0 0 0 3 1 0 0 0 0 3 1 0 0 0 0 3 1 0 0 0 0 0
3 3 3 3 3 3 3
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1. 1.
1 20000. 0.3 0.
 3
 1 2 3
0. -25. 0. -50. 0. -25.

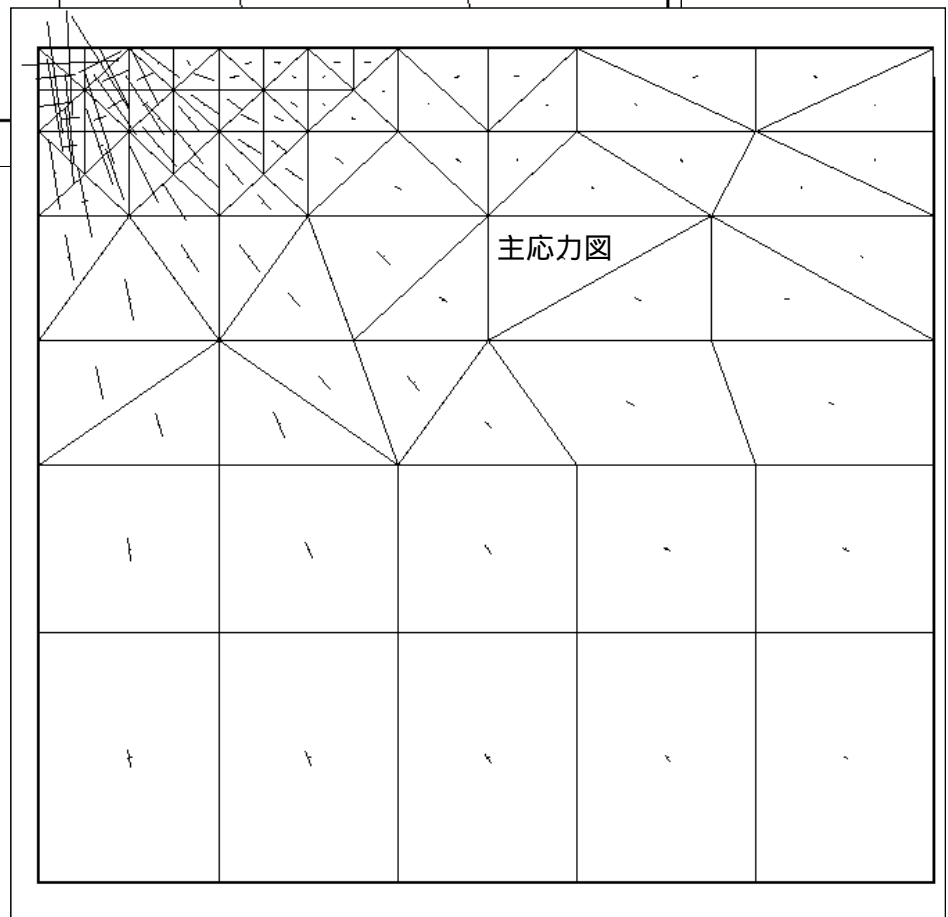
```

計算結果と表示

鉛直応力の等値線



主応力分布



変位・変形図

