

基礎地盤の不等沈下による円筒形タンクの応力・変形挙動について

北海道大学 正員 茅村 仁
北海道大学 正員 O三上 隆

1. まえがき わが国においては、石油備蓄のための円筒形タンクが海岸埋立地など比較的脆弱地盤上に建設されるようになり、昭和49年の豊田流出事故以来、石油タンクは社会的に注目を浴びその安全性の問題が大きく取りあげられるようになってきた。しかし流出事故が発生すれば、多量の石油が広い範囲に流出し大きな社会問題となることを考えると、タンク設計には、液圧地盤力風荷重温度変化など種々の負荷状態およびタンク基礎の圧密沈下量の不均一によって生じる基礎の不等沈下などを考慮した定量的な設計が望まれる。

本報告は不等沈下のタンク挙動に与える影響を検討するため、不等沈下量をタンク本体に強制変位として与える方法により、有限差分法による非線形解析を試みたいものである。

2. 解析方法 円筒形タンクの主要構造は基礎上の底板および側板より構成されておられ、本報告では、底板を一様な弾性ばねで支持された円板(Winkler型基礎土の円板)とし、側板を円筒板とし微小変形理論により解析をする。

(1) 不等沈下の取扱いは

円筒形タンクの不等沈下として、(1)側板直下の円周に沿った不等沈下、(2)底板の高低形状などをわける。本報告では不等沈下として前述のようにタンク本体に強制変位として与える方法により解析をする。以下に剛性マトリックスによる計算方法を説明する。

いま構造物全体の平衡方程式を次式で与える。

$$X = KU \quad \text{----- (1)}$$

式(1)に対する一般形として次式で表わすことができる。

$$\begin{Bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_\gamma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\alpha\alpha} & K_{\alpha\beta} & K_{\alpha\gamma} \\ K_{\beta\alpha} & K_{\beta\beta} & K_{\beta\gamma} \\ K_{\gamma\alpha} & K_{\gamma\beta} & K_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_\gamma \end{Bmatrix} \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 X_α = 一連の負荷節点力、 U_α = 未知節点変位、 U_β = 変位が指定された節点変位、 U_γ = 境界(支持)条件により零に等しい変位、 X_β = 未知の力、 X_γ = 反力である。

式(2)において、 $U_\gamma = 0$ であり、 U_β が既知であるので、 $X_\alpha = K_{\alpha\alpha} U_\alpha + K_{\alpha\beta} U_\beta$ ----- (3)

したがって、式(3)より未知の変位 U_α は次式で与えられる。

$$U_\alpha = K_{\alpha\alpha}^{-1} (X_\alpha - K_{\alpha\beta} U_\beta) \quad \text{----- (4)}$$

もし、負荷節点力 $X_\alpha = 0$ なら

$$U_\alpha = -K_{\alpha\alpha}^{-1} K_{\alpha\beta} U_\beta \quad \text{----- (4')}$$

この U_α をより、要素の断面力が求められる。

(2) 側板要素の剛性マトリックス

図-1に示すように長手方向(x)方向変位を u 、円周方向(θ 方向)を v 、半径方向変位を w とし、要素両端を i 節点、j 節点と名付ける。

面外ひずみを ϵ_x 、 ϵ_θ 、 $\epsilon_{x\theta}$ 、面外ひずみを χ_r 、 χ_θ 、 $\chi_{x\theta}$ と表わす。応力-ひずみ関係は等弾性を仮定すると次式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ N_{x\theta} \\ M_x \\ M_\theta \\ M_{x\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B & \nu B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu B & B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D & \nu D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \nu D & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_{x\theta} \\ \chi_x \\ \chi_\theta \\ \chi_{x\theta} \end{Bmatrix} \quad \text{----- (5)}$$

ここで、 $N_x, N_\theta, N_{x\theta}$ は応力、 $M_x, M_\theta, M_{x\theta}$ は曲げおよびねじりモーメントであり、 ν はポアソン比、 E は弾性係数、 h は板厚であり、 $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ 、 $B = Eh/(1-\nu^2)$ である。

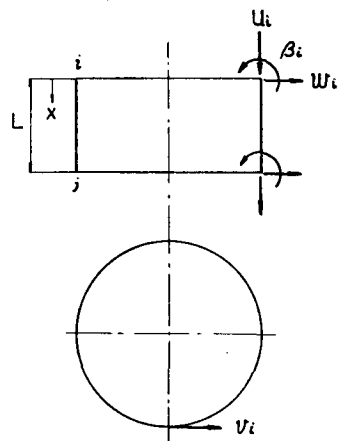


図-1 側板要素

ひずみ-変位の関係は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_\theta = \frac{1}{a} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + w \right), \quad \gamma_{r\theta} = \frac{1}{a} \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \chi_x &= \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \chi_\theta = -\frac{1}{a^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{\partial v}{\partial \theta} \right), \quad \chi_{r\theta} = \frac{1}{a} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

ここで、 $a = r = r_0$ 半径

要素についての変位関数を長さ方向には多項式で、円周方向はフーリエ級数で展開すると、変位 u, v, w は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} u &= \{ (1 - x/L) u_i^{(m)} + (x/L) u_j^{(m)} \} \cos n\theta = [F]_n \{ u_i^{(m)} \} \\ v &= \{ (1 - x/L) v_i^{(m)} + (x/L) v_j^{(m)} \} \sin n\theta = [Y]_n \{ v_i^{(m)} \} \\ w &= \{ (1 - 3x^2/L^2 + 2x^3/L^3) w_1^{(m)} + (x - 2x^2/L + x^3/L^2) \beta_1^{(m)} + \\ &\quad (3x^2 - 2x^3/L) w_2^{(m)} + (-x^2/L + x^3/L^2) \beta_2^{(m)} \} \cos n\theta = [N]_n \{ w_i^{(m)} \} \end{aligned}$$

ここで、 $L =$ 要素の長さ

$$\begin{aligned} \{ u_i^{(m)} \} &= \{ u_i^{(m)} \}^T, \quad \{ v_i^{(m)} \} = \{ v_i^{(m)} \}^T \\ \{ w_i^{(m)} \} &= \{ w_1^{(m)} \}^T \{ \beta_1^{(m)} \}^T \{ w_2^{(m)} \}^T \{ \beta_2^{(m)} \}^T \\ [F]_n &= [F_1 \ F_2] = \begin{bmatrix} (1-x/L) \cos n\theta & (x/L) \cos n\theta \end{bmatrix} \\ [Y]_n &= [Y_1 \ Y_2] = \begin{bmatrix} (1-x/L) \sin n\theta & (x/L) \sin n\theta \end{bmatrix} \\ [N]_n &= [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4] = \begin{bmatrix} (1-3x^2/L^2 + 2x^3/L^3) \cos n\theta & (x-2x^2/L + x^3/L^2) \cos n\theta \\ (3x^2 - 2x^3/L) \cos n\theta & (-x^2/L + x^3/L^2) \cos n\theta \end{bmatrix} \end{aligned}$$

要素のひずみエネルギーを求めると次式で表わされる。

$$U = \frac{1}{2} \int \int [B \{ \epsilon_x + \epsilon_\theta \}^2 + 2(1-\nu) \chi_{r\theta} \gamma_{r\theta} - \epsilon_x \epsilon_\theta] \gamma \, d\alpha \, d\theta \quad (8)$$

側板要素の剛性マトリックスは式(6),(7),(8)より、ポテンシャルエネルギー最小の原理より次式のように得られる。

$$[K_S]_n \{ \delta_j \}_n = \{ F_j \}_n \quad (9)$$

ここで $\{ F_j \}_n$ は等価節点力、 $[K_S]_n$ は側板の剛性マトリックス、 $\{ \delta_j \}_n$ は節点変位である。 $[K_S]_n$ などの内容は以下のように表わされる。

$$[K_S]_n = \begin{bmatrix} (K_{uu})_{rk} & (K_{uv})_{rk} & (K_{uw})_{rk} \\ (K_{vu})_{rk} & (K_{vv})_{rk} & (K_{vw})_{rk} \\ (K_{wu})_{rk} & (K_{wv})_{rk} & (K_{ww})_{rk} \end{bmatrix}, \quad \{ \delta_j \}_n = \begin{Bmatrix} u_i^{(m)} \\ v_i^{(m)} \\ w_i^{(m)} \end{Bmatrix}$$

ここで、

$$\begin{aligned} (K_{uu})_{rk} &= \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(\alpha B \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial x^2} + \frac{1-\nu}{2a} B \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} \right) d\theta \, dx \quad (r=1,2 \quad k=1,2) \\ (K_{uv})_{rk} &= \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(\nu B \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial x \partial \theta} + \frac{1-\nu}{2} B \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} \right) d\theta \, dx \quad (r=1,2 \quad k=1,2) \\ (K_{uw})_{rk} &= \int_0^{2\pi} \int_0^L \nu B \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} N_k \, d\theta \, dx \quad (r=1,2 \quad k=1,2) \\ (K_{vw})_{rk} &= \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(\nu B \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} + \frac{1-\nu}{2} B \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} \right) d\theta \, dx \quad (r=1,2 \quad k=1,2) \end{aligned}$$

$$(K_{uv})_{rk} = \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(\frac{B}{a} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} + \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} + \frac{2\nu(1-\nu)}{a} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial x \partial \theta} \right) d\theta \, dx \quad (r=1,2 \quad k=1,2)$$

$$(K_{uu})_{rk} = \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(\frac{B}{a} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} N_k - \frac{\nu B}{a} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} N_k - \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} - \frac{2\nu(1-\nu)}{a} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial x \partial \theta} \right) d\theta \, dx \quad (r=1,2 \quad k=1,2)$$

$$(K_{uv})_{rk} = \int_0^{2\pi} \int_0^L \nu B N_k \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} \, d\theta \, dx \quad (r=1,2 \quad k=1,2)$$

$$(K_{uw})_{rk} = \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(\frac{B}{a} N_k \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} - \frac{\nu B}{a} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} - \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} - \frac{2\nu(1-\nu)}{a} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial x \partial \theta} \right) d\theta \, dx \quad (r=1,2 \quad k=1,2)$$

$$(K_{vw})_{rk} = \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(\alpha B \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} + \frac{\nu B}{a} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} + \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} \quad (r=1,2 \quad k=1,2)$$

$$\frac{2\nu(1-\nu)}{a} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta} \frac{\partial \psi_k}{\partial x} \quad (r=1,2 \quad k=1,2)$$

(3) 底板要素の剛性マトリックス

図-2に示す

底板モデルを考える。底板は一概等弾性板で支持された円板とみなし弾性は均一とし、Mindlin理論は仮定する。図-2に

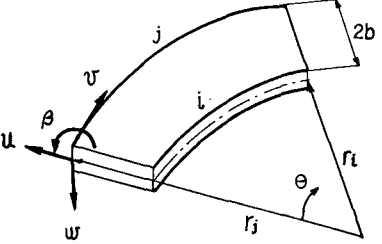


図-2 底板要素

おいて、半径方向変位 u 、円周方向変位を v 、鉛直方向変位を w と表わす。

面内ひずみを $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \gamma_{r\theta}$ 、面外ひずみを $\chi_r, \chi_\theta, \chi_{r\theta}$ と表わし、等弾性を仮定すると応力-ひずみ関係式は次式のように与えられる。

$$\begin{Bmatrix} N_r \\ N_\theta \\ N_{r\theta} \\ M_r \\ M_\theta \\ M_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B & \nu B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu B & B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D & \nu D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \nu D & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \gamma_{r\theta} \\ \chi_r \\ \chi_\theta \\ \chi_{r\theta} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 $N_r, N_\theta, N_{r\theta}$ は応力、 $M_r, M_\theta, M_{r\theta}$ は曲げモーメントと見做すことができる。他の符号、 ν, B, D などは側板要素と同様である。

ひずみ-変位関係式は次式で表示できる。

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \epsilon_\theta = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + u \right), \quad \gamma_{r\theta} = \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \\ \chi_r &= \frac{\partial^2 w}{\partial r^2}, \quad \chi_\theta = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r}, \quad \chi_{r\theta} = -\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (12)$$

変位関数は側板要素と同様に長々(ν方向)は多項式で、円周方向(θ方向)にはフーリエ級数で展開する。

変位 u, w, ψ は次式で与えられる。

$$u = \left[(1-\nu/2)u_i^{(n)} + (\nu/2)u_j^{(n)} \right] \cos n\theta = [\Phi]_n \{u\}_n$$

$$\psi = \left[(1-\nu/2)\psi_i^{(n)} + (\nu/2)\psi_j^{(n)} \right] \sin n\theta = [\Psi]_n \{\psi\}_n \quad (13)$$

$$w = \left[(1-3\nu/4 + \nu/4)w_i^{(n)} + (\nu/4 - \nu/2)\beta_i^{(n)} + (3\nu/4 - \nu/2)w_j^{(n)} + (\nu/4 - \nu/2)\beta_j^{(n)} \right] \cos n\theta = [N]_n \{w\}_n$$

ここで、 $R = (r - r_i)/b$, $b = (r_j - r_i)/2$, $\{u\}_n = \{u_i^{(n)}, u_j^{(n)}\}$
 $\{\psi\}_n = \{\psi_i^{(n)}, \psi_j^{(n)}\}$, $\{w\}_n = \{w_i^{(n)}, \beta_i^{(n)}, w_j^{(n)}, \beta_j^{(n)}\}$
 $[\Phi]_n = [\Phi_1, \Phi_2] = [(1-\nu/2)\cos n\theta, (\nu/2)\cos n\theta]$
 $[\Psi]_n = [\Psi_1, \Psi_2] = [(1-\nu/2)\sin n\theta, (\nu/2)\sin n\theta]$
 $[N]_n = [N_1, N_2, N_3, N_4] = [(1-3\nu/4 + \nu/4)\cos n\theta, (\nu/4 - \nu/2)\cos n\theta, (3\nu/4 - \nu/2)\cos n\theta, (\nu/4 - \nu/2)\cos n\theta]$

弾性係数(地盤反力係数)を E_s とし、弾性は向上の底板のひずみエネルギーを求めると次式で与えられる。

$$U = \frac{1}{2} \int \int \int [B \{(\epsilon_r + \epsilon_\theta)^2 + 2(1-\nu)(\epsilon_r \epsilon_\theta - \epsilon_r \epsilon_\theta)\} + D \{(\chi_t + \chi_\theta)^2 + 2(1-\nu)(\chi_t \chi_\theta - \chi_t \chi_\theta)\} + E_s w^2] \nu d\theta dr \quad (14)$$

底板要素の平衡方程式はポテンシャルエネルギー最小の原理より次式のように得られる。

$$[K_p]_n \{S\}_n = \{F\}_n \quad (15)$$

ここで、 $[K_p]_n$ は底板の剛性マトリックスの第 n 項で、その内容は以下に示すようになる。

$$[K_p]_n = \begin{bmatrix} (K_{uu})_{rk} & (K_{uw})_{rk} & 0 \\ (K_{uw})_{rk} & (K_{ww})_{rk} & 0 \\ 0 & 0 & (K_{\psi\psi})_{rk} \end{bmatrix} \{S\}_n = \begin{Bmatrix} u_j^{(n)} \\ w_j^{(n)} \\ \psi_j^{(n)} \end{Bmatrix}$$

ここで、

$$(K_{uu})_{rk} = \int_{r_i}^{r_j} \int_{\theta=0}^{2\pi} \left[B \nu \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial r^2} + \frac{B}{r} \psi_k \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial r^2} + \frac{1-\nu}{2} B \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial r \partial \theta} + D \nu \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} \right] x d\theta dr \quad (k=1,2 \quad r=1,2)$$

$$(K_{uw})_{rk} = \int_{r_i}^{r_j} \int_{\theta=0}^{2\pi} \left[\frac{B}{r} \psi_k \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} + \frac{1-\nu}{2} B \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta \partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \psi_k \right] x d\theta dr \quad (k=1,2 \quad r=1,2)$$

$$(K_{ww})_{rk} = \int_{r_i}^{r_j} \int_{\theta=0}^{2\pi} \left[\frac{B \nu}{r} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} + \frac{1-\nu}{2} B \left(\frac{\partial \psi_k}{\partial r} \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \psi_k \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \right) + D \nu \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} \right] x d\theta dr \quad (k=1,2 \quad r=1,2)$$

$$(K_{\psi\psi})_{rk} = \int_{r_i}^{r_j} \int_{\theta=0}^{2\pi} \left[\frac{B \nu}{r} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} + \frac{1-\nu}{2} B \left(\frac{\partial \psi_k}{\partial r} \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \psi_k \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \right) - \frac{\partial \psi_k}{\partial r} \psi_k \right] x d\theta dr \quad (k=1,2 \quad r=1,2)$$

$$(K_{uw})_{rk} = \int_{r_i}^{r_j} \int_{\theta=0}^{2\pi} \left[D \left(\frac{\partial \psi_k}{\partial r} \frac{\partial \psi_k}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_k}{\partial r} \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} + 2 \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \frac{\partial \psi_k}{\partial r} \right) \right] x d\theta dr$$

$$+ \frac{2D}{r} \left(\frac{\partial \psi_k}{\partial r} \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} + \frac{\partial \psi_k}{\partial r} \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \right) + 2D(1-\nu) \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial \psi_k}{\partial r} \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \frac{\partial \psi_k}{\partial r} \right) - \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \theta^2} \psi_k + E_s \nu \psi_k \psi_k \int d\theta dr \quad (r=1,2)$$

3. 解析例

図-3に示すような下端($t=0$)でヒンジ条件、上端($t=l$)で自由境界条件の円筒板に下向き均等圧下

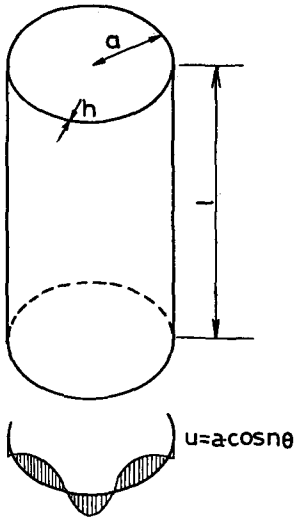


図-3 側板直下の不均等下

を与え、種々の n ($n=1, 2, 4, 8$) で解析をする。諸元は次に示す通り、半径 $a=7m$ 、板厚 $h=0.25m$ 、側板高 $l=26.46m$

ポアソン比 $\nu=0.20$ 、弾性係数 $E=3 \times 10^6 t/m^2$ である。分割数は 80 分割で、 $\theta=0$ に付する結果を図-4, 5 に示す。図-4 は側板の半径方向変位を図示したもので、図より、波数 n が 1, 2 のときはほぼ直線状の変化を示し、波数が大きくなると側板上端での変位が小さくなり、 $n=8$ では下端近傍で n が変形して居る。

図-5 は長々方向曲げモーメント M_x を図示した結果である。波数 n が大きくなる程、 M_x の値が大きくなって居る。次に弾性基礎上の円筒形タマの解析例を示す。諸元は、底板、側板の板厚 $h=25cm$ 、半径 $a=8m$ 、側板高さ $l=15.3m$ 、弾性係数 $E=20 \times 10^9 t/m^2$ 、ポアソン比 $\nu=1/6$ 、地盤反力係数 $E_s=2k t/m^3$ である。分割数は底板部は 80 分割、側板部は 120 分割である。不均等下は側板直下に右方均等圧下 $u=1cm \cos \theta$ を与えた。結果を図-6, 7 に示す。図-6 は変位について、底板部は鉛直方向変位 w_p 、側板部は半径方向変位 w_r を示したものである。側板部では、ほぼ直線変化し、その値は上端で最大となっている。図-7 は底板部の半径方向曲げモーメント M_r 、側板部については長々方向曲げモーメント M_x を図示した。図より、底板、側板接合部で大きな値を示す。

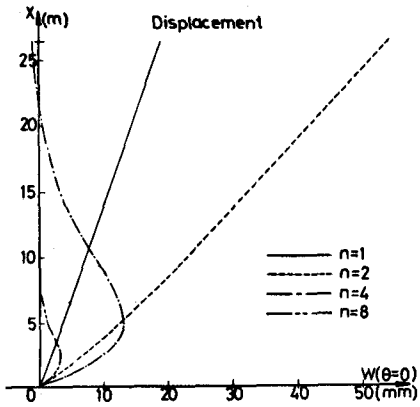


図-4 変位 w

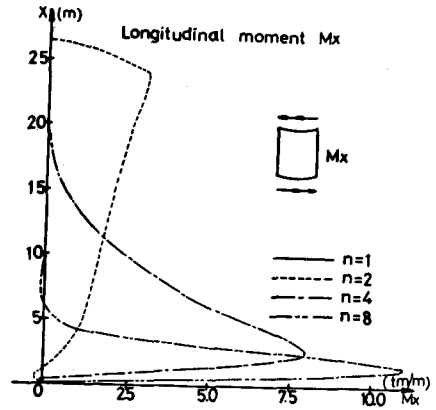


図-5 曲げモーメント M_x

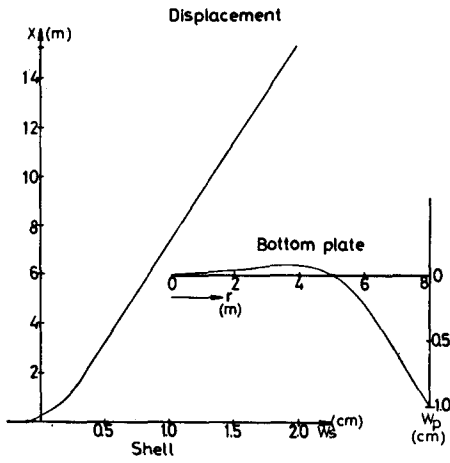


図 5 底板, 側板の変位

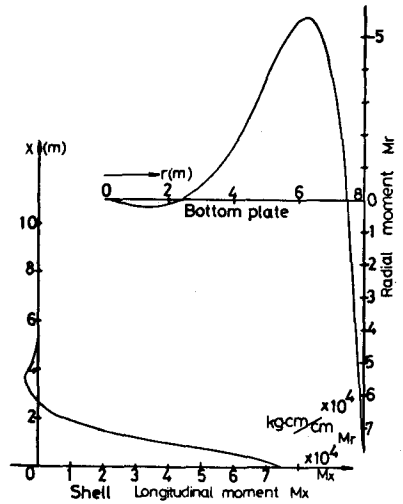


図 7 底板, 側板の曲げモーメント M_r, M_x

参考文献 Cheung, Y.K: Finite Strip Method in Structural Analysis, Pergamon press, 1976