コンクリート製容器のライナ・アンカー解析* (効率的な解法の選択と異なる寸法のアンカー混在の影響の検討)

大 矢 弘 史^{*1}, 及 川 里 奈^{*2}

Analysis of Liner-Anchor System for Concrete Vessel (Selection of Effective Method of Analysis and Investigation of Effects of Different Size Anchors)

Hiroshi OHYA and Rina OIKAWA

The liner of a concrete vessel is strained by concrete deformation. In the design of a liner with anchors, stress analyses of the liner-anchor system are performed to determine the force on the liner and displacement of anchors. Nonlinear simultaneous equations are solved to analyze the liner-anchor system. In the present paper, three methods of analysis--the iterative method, the incremental method and the incremental-iterative combined method--are proposed to solve the nonlinear equations. Obtained results are compared to investigate the method of analysis. It is confirmed that the incremental method offers the most efficient analysis of the liner-anchor system. Usually, all anchors are assumed to have the same dimensions, but anchors of different sizes are often used in actual structures. Liners with two sizes of stud anchors are analyzed, and the effects of different anchors are investigated.

Key Words: Liner, Anchor, Concrete Vessel, Stress Analysis, Design, Nonlinear Problem

1. 緒 言

コンクリート製容器内面にアンカーを介して固定されているライナは、コンクリートの乾燥収縮、コンクリートとの熱膨張差、またプレストレストコンクリートの場合プレストレス時にコンクリートから圧縮ひずみを受け座屈する可能性がある。実際には、すべてのライナが同時に座屈するわけではないので、先に座屈し剛性が低下したライナに隣接するアンカーは、両側のライナの剛性差により大きく変位し破壊する可能性があり、アンカーの設計にはこの変位を解析、評価する必要がある。そこでこの問題を、ライナおよびアンカーシステムのある1箇所のライナが最初から曲がり剛性が低下している構造にモデル化し(図1)、ライナに圧縮ひずみを与えてアンカー変位を計算することが行われている。

この解析には非線形連立方程式の計算が必要であり、これまで反復法が用いられてきたが^{(1)~(4)}、反復法

は条件によっては収束しないという問題がある。またこれまでは、すべてのアンカーの寸法が等しいと考えて解析、評価されてきたが^{(1)~(4)}、実際の構造では異なる寸法のアンカーが混在することがある⁽⁵⁾。しかし、この影響については検討されていない。

そこでここでは、増分法、および増分法と反復法を併用した方法について定式化を行い、反復法を含めた計算結果の比較により、最も有効な解法の選定を行った。また定式化に際しては、反復法を含めて、異なる寸法のアンカーが混在する場合も取扱えるようにし、計算結果によりこの影響について検討を行った。

2. 理論および解析手順

ここでは、図1に示すシステムを一次元モデルに置き換え、アンカーおよび最初から曲がったベントプレートを非線形ばね、真直ぐなライナを線形ばねでモデル化し、各ライナにコンクリートから圧縮ひずみが与

図1 ライナ・アンカーシステム

* 平成3年3月19日 関西支部第66期定時総会講演会および、平成3年11月1日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成5年2月26日。

^{*1} 正員、石川島播磨重工業(株)技術研究所 (〒135 東京都江東区豊洲3-1-15)。

^{*2} 石川島播磨重工業(株)技術研究所。

図 2 解析モデル

図 3 アンカー A_i 図 4 アンカー A_n

えられた場合を考え、アンカー変位を求めることにする。解析対象として、図 2 に示すような、両端が固定され途中にベントプレートが 1 個あるシステムを考える。なお、 $N+1$ 個のライナのうち、 n 番めのライナがベントプレートとする。また、以下の式において、下付添字 i は、 i 番めのライナ、あるいはアンカーに関する値であることを意味する。

真直ぐなライナ (N 個)

i 番めのライナ ($i=1 \sim N+1, i \neq n$) について

t_i : 板厚

L_i : 長さ

E_i : ヤング率

σ_i : コンクリートから与えられるひずみより計算した圧縮応力

k_i : ばね定数 $= E_i t_i / L_i$

アンカー (N 個)

i 番めのアンカー A_i ($i=1 \sim N$) について

U_i : アンカー変位

$f_i(U_i)$: 変位 U_i に対するアンカー荷重

ベントプレート (1 個)

$U_n - U_{n-1}$: ベントプレート変位 (両端のアンカーの変位差)

$g(U_n - U_{n-1})$: 変位 $U_n - U_{n-1}$ に対するベントプレート荷重

アンカー変位 U はコンクリートに対する相対変位である。またアンカー荷重 f およびベントプレート荷重 g はそれぞれの変位の非線形な関数であり (非線形ばね)、これらの非線形な関係は、アンカーのせん断試験、初期たわみを有する帯板の圧縮試験、あるいは対応する計算により求める⁽³⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

2.1 反復法 ここではまず反復法について、異なる径のアンカーが混在する場合が取扱えるように定式化を行う。アンカー A_i (図 3) の力の釣合いを考える

と次式が成立する。ただし P_i は、 i 番めのライナに働く力である。

$$P_{i+1} = P_i + f_i(U_i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$P_i = \sigma_i t_i - k_i (U_{i-1} - U_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$P_{i+1} = \sigma_{i+1} t_{i+1} - k_{i+1} (U_i - U_{i+1}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式 (2), (3) は、 i 番め、 $i+1$ 番めのライナにコンクリートから与えられる圧縮応力 σ_i, σ_{i+1} が、両端のアンカーの変位により緩和されることを意味している。式 (2), (3) を式 (1) に代入し整理すると

$$\begin{aligned} & -k_i U_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) U_i - k_{i+1} U_{i+1} \\ & = -\sigma_i t_i + \sigma_{i+1} t_{i+1} - f_i(U_i) \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

また、アンカー A_n (図 4) の力の釣合いを考えると次式が成立する。

$$P_{n+1} = P_n + f_n(U_n) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$P_n = g(U_n - U_{n-1}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$P_{n+1} = \sigma_{n+1} t_{n+1} - k_{n+1} (U_n - U_{n+1}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

式 (6), (7) を式 (5) に代入し整理すると

$$\begin{aligned} & k_{n+1} U_n - k_{n+1} U_{n+1} \\ & = \sigma_{n+1} t_{n+1} - f_n(U_n) - g(U_n - U_{n-1}) \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

すべてのアンカー ($i=1 \sim N$) について力の釣合いを考えると、最終的に次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} & (k_1 + k_2) U_1 - k_2 U_2 = -\sigma_1 t_1 + \sigma_2 t_2 - f_1(U_1) \\ & \dots\dots\dots \\ & -k_i U_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) U_i - k_{i+1} U_{i+1} \\ & = -\sigma_i t_i + \sigma_{i+1} t_{i+1} - f_i(U_i) \\ & \dots\dots\dots \\ & k_{n+1} U_n - k_{n+1} U_{n+1} \\ & = \sigma_{n+1} t_{n+1} - f_n(U_n) - g(U_n - U_{n-1}) \\ & \dots\dots\dots \\ & -k_N U_{N-1} + (k_N + k_{N+1}) U_N \\ & = -\sigma_N t_N + \sigma_{N+1} t_{N+1} - f_N(U_N) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)は $U_i (i=1 \sim N)$ に関する N 元連立方程式であるが、右辺にこれに関する非線形項 $f_i(U_i) (i=1 \sim N)$, $g(U_n - U_{n-1})$ が含まれるため、このままでは解けず反復法により解析する。

以下ここでは解析手順について示す。反復の $j-1$ ステップにおいて、アンカー変位 $U_i^{j-1} (i=1 \sim N)$ が求まり、かつこの変位が力の釣合いを満足していない場合を考える(上付添字 $j-1$ は、反復の $j-1$ ステップを意味する)。不釣合い力 R_i^{j-1} は、

$$R_i^{j-1} = k_i U_i^{j-1} - (k_i + k_{i+1}) U_i^{j-1} + k_{i+1} U_{i+1}^{j-1} - \sigma_i t_i + \sigma_{i+1} t_{i+1} - f_i(U_i^{j-1}) \dots \dots \dots (10)$$

U_i^{j-1} から ΔU_i だけ変化すると釣合いを満足すると考えると

$$0 = k_i (U_i^{j-1} + \Delta U_i) - (k_i + k_{i+1}) (U_i^{j-1} + \Delta U_i) + k_{i+1} (U_{i+1}^{j-1} + \Delta U_{i+1}) - \sigma_i t_i + \sigma_{i+1} t_{i+1} - f_i(U_i^{j-1} + \Delta U_i) \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 $f_i(U_i^{j-1} + \Delta U_i)$ を $f_i(U_i^{j-1})$ で近似すると、式(10)および式(11)より次式が成立する。

$$R_i^{j-1} = -k_i \Delta U_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) \Delta U_i - k_{i+1} \Delta U_{i+1} \dots \dots \dots (12)$$

$R_i^{j-1} (i=1 \sim N)$ は、 $j-1$ ステップにおける不釣合い力であるが、これをこのまま用いて計算し補正変位 $\Delta U_i (i=1 \sim N)$ を求めようとすると数値計算上不安定が生じる。そこで、ここでは係数 $\gamma (0 < \gamma < 1)$ を導入し、不釣合い力の一部を使って補正することにする。

$$-k_i \Delta U_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) \Delta U_i - k_{i+1} \Delta U_{i+1} = \gamma R_i^{j-1} \dots \dots \dots (13)$$

式(13)を式(9)と同じような形式で書くと、

$$\left. \begin{aligned} (k_1 + k_2) \Delta U_1 - k_2 \Delta U_2 &= \gamma R_1^{j-1} \\ \dots \dots \dots \\ -k_i \Delta U_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) \Delta U_i - k_{i+1} \Delta U_{i+1} &= \gamma R_i^{j-1} \\ \dots \dots \dots \\ -k_N \Delta U_{N-1} + (k_N + k_{N+1}) \Delta U_N &= \gamma R_N^{j-1} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (14)$$

式(14)は、 $\Delta U_i (i=1 \sim N)$ についての N 元連立一次方程式であり、これを解いて補正変位 ΔU_i を求める。

j ステップにおける変位は次式により与えられる。

$$U_i^j = U_i^{j-1} + \Delta U_i \quad (i=1 \sim N) \dots \dots \dots (15)$$

変位 U_i^j を用いて j ステップにおける不釣合い力 R_i^j を計算し、収束の判定は次式で行う。

$$\left| \frac{R_i^j}{f_i(U_i^j)} \right| \leq \epsilon_{\max} \quad (i=1 \sim N), \quad \epsilon_{\max} : \text{許容誤差} \dots \dots \dots (16)$$

式(16)を満足しないときには $j+1$ ステップに進み、収束した解が得られるまでこれを繰返す。式(16)を満足したときには収束したと考えて、 $U_i^j (i=1 \sim N)$ を式(9)の解 $U_i (i=1 \sim N)$ とする。

真直ぐなライナ、ベントプレートの応力 S は、このアンカー変位を用いて次式より計算する。

真直ぐなライナ

$$S_i = \frac{P_i}{t_i} = \sigma_i - \frac{E_i}{L_i} (U_{i-1} - U_i) \quad (i=1 \sim N, i \neq n) \dots \dots \dots (17)$$

ベントプレート

$$S_n = \frac{P_n}{t_n} = \frac{g(U_n - U_{n-1})}{t_n} \dots \dots \dots (18)$$

2・2 増分法 コンクリートから与えられる圧縮応力 σ_i を、微小な増分 $\Delta \sigma_i (\Delta : \text{増分})$ に分けて加え、各増分ステップ内では線形化して計算を行う。

増分の n ステップを考える。前のステップの最終状態におけるアンカー変位 $U_i^{(n-1)} (i=1 \sim N)$ は既知である(上付添字 $(n-1)$ は、増分の $n-1$ ステップを意味する)。アンカー A_i (図3)の力の釣合いを考えると次式が成立する。

$$P_{i+1}^{(n)} = P_i^{(n)} + f_i(U_i^{(n)}) \dots \dots \dots (19)$$

$$P_i^{(n)} = P_i^{(n-1)} + \Delta P_i^{(n)} \dots \dots \dots (20)$$

$$P_{i+1}^{(n)} = P_{i+1}^{(n-1)} + \Delta P_{i+1}^{(n)} \dots \dots \dots (21)$$

$$f_i(U_i^{(n)}) = f_i(U_i^{(n-1)} + \Delta U_i^{(n)}) = f_i(U_i^{(n-1)}) + \Delta f_i(U_i^{(n-1)}, \Delta U_i^{(n)}) \dots \dots \dots (22)$$

また、

$$P_i^{(n-1)} = \sigma_i^{(n-1)} t_i - k_i (U_{i-1}^{(n-1)} - U_i^{(n-1)}) \dots \dots \dots (23)$$

$$\Delta P_i^{(n)} = \Delta \sigma_i t_i - k_i (\Delta U_i^{(n)} - \Delta U_i^{(n-1)}) \dots\dots\dots (24)$$

$$P_{i+1}^{(n-1)} = \sigma_{i+1}^{(n-1)} t_{i+1} - k_{i+1} (U_i^{(n-1)} - U_{i+1}^{(n-1)}) \dots\dots\dots (25)$$

$$\Delta P_{i+1}^{(n)} = \Delta \sigma_{i+1} t_{i+1} - k_{i+1} (\Delta U_i^{(n)} - \Delta U_{i+1}^{(n)}) \dots\dots\dots (26)$$

式(20)～(26)を式(19)に代入し整理すると、

$$-k_i \Delta U_i^{(n)} + (k_i + k_{i+1}) \Delta U_i^{(n)} - k_{i+1} \Delta U_{i+1}^{(n)} = -\Delta \sigma_i t_i + \Delta \sigma_{i+1} t_{i+1} - \Delta f_i(U_i^{(n-1)}, \Delta U_i^{(n)}) + R_i^{(n-1)} \dots\dots\dots (27)$$

ただし、 $R_i^{(n-1)}$ は、 $n-1$ ステップにおける不釣り合い力であり、次式で与えられる。

$$R_i^{(n-1)} = P_{i+1}^{(n-1)} - P_i^{(n-1)} - f_i(U_i^{(n-1)}) \dots\dots\dots (28)$$

ここで、 $\Delta U_i^{(n)}$ に関する非線形関数 $\Delta f_i(U_i^{(n-1)}, \Delta U_i^{(n)})$ を

$$\Delta f_i(U_i^{(n-1)}, \Delta U_i^{(n)}) = \frac{df_i(U_i^{(n-1)})}{dU} \Delta U_i^{(n)} \dots\dots\dots (29)$$

とおき線形化すると、式(27)は、

$$-k_i \Delta U_i^{(n)} + \left[k_i + k_{i+1} + \frac{df_i(U_i^{(n-1)})}{dU} \right] \Delta U_i^{(n)} - k_{i+1} \Delta U_{i+1}^{(n)} = -\Delta \sigma_i t_i + \Delta \sigma_{i+1} t_{i+1} + R_i^{(n-1)} \dots\dots\dots (30)$$

すべてのアンカー($i=1 \sim N$)について力の釣り合いを考えると、最終的に次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} & \left[k_1 + k_2 + \frac{df_1(U_1^{(n-1)})}{dU} \right] \Delta U_1^{(n)} - k_2 \Delta U_2^{(n)} = -\Delta \sigma_1 t_1 + \Delta \sigma_2 t_2 + R_1^{(n-1)} \\ & \dots\dots\dots \\ & -k_i \Delta U_i^{(n)} + \left[k_i + k_{i+1} + \frac{df_i(U_i^{(n-1)})}{dU} \right] \Delta U_i^{(n)} - k_{i+1} \Delta U_{i+1}^{(n)} = -\Delta \sigma_i t_i + \Delta \sigma_{i+1} t_{i+1} + R_i^{(n-1)} \\ & \dots\dots\dots \\ & -k_N \Delta U_N^{(n)} + \left[k_N + k_{N+1} + \frac{df_N(U_N^{(n-1)})}{dU} \right] \Delta U_N^{(n)} = -\Delta \sigma_N t_N + \Delta \sigma_{N+1} t_{N+1} + R_N^{(n-1)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (31)$$

式(31)は $\Delta U_i^{(n)}$ ($i=1 \sim N$) についての N 元連立一次方程式であり、これを解いて変位増分 $\Delta U_i^{(n)}$ を求める。

増分の n ステップの最終状態におけるアンカー変位は次式で与えられる。

$$U_i^{(n)} = U_i^{(n-1)} + \Delta U_i^{(n)} \quad (i=1 \sim N) \dots\dots\dots (32)$$

引続き増分の $n+1$ ステップの計算を行い、必要な圧縮応力 σ_i に達するまで増分を繰返す。最終ステップにおけるアンカー変位を解とし、またこの変位を用いて真直ぐなライナ、ベントプレートの応力を計算する。

2・3 増分法と反復法の併用法 この方法は、増分ステップの中で反復を行い、各増分ごとに力の釣り合いを完全に満足させる方法である(以下、併用法と称す)。増分の n ステップを考える。前のステップの最終状態におけるアンカー変位 $U_i^{(n-1)}$ ($i=1 \sim N$) は既知である。アンカー A_i (図3)の力の釣り合いを考えると、式(27)に対応する式として次式が成立する。

$$-k_i \Delta U_i^{(n)} + (k_i + k_{i+1}) \Delta U_i^{(n)} - k_{i+1} \Delta U_{i+1}^{(n)} = -\Delta \sigma_i t_i + \Delta \sigma_{i+1} t_{i+1} - \Delta f_i(U_i^{(n-1)}, \Delta U_i^{(n)}) \dots\dots\dots (33)$$

増分 n ステップにおける、反復 $j-1$ ステップの最終状態におけるアンカー変位増分 $\Delta U_i^{(n)j-1}$ が求まり、かつこの変位増分が力の釣り合いを満足していない場合を考える(上付添字 $(n)j-1$ は、増分の n ステップにおける反復の $j-1$ ステップを意味する)。不釣り合い力 $R_i^{(n)j-1}$ は、

$$R_i^{(n)j-1} = k_i \Delta U_i^{(n)j-1} - (k_i + k_{i+1}) \Delta U_i^{(n)j-1} + k_{i+1} \Delta U_{i+1}^{(n)j-1} - \Delta \sigma_i t_i + \Delta \sigma_{i+1} t_{i+1} - \Delta f_i(U_i^{(n-1)}, \Delta U_i^{(n)j-1}) \dots\dots (34)$$

$\Delta U_i^{(n)j-1}$ から ΔU_i だけ変化すると釣り合いを満足すると考えると

$$\begin{aligned} 0 &= k_i (\Delta U_i^{(n)j-1} + \Delta U_i) - (k_i + k_{i+1}) (\Delta U_i^{(n)j-1} + \Delta U_i) + k_{i+1} (\Delta U_{i+1}^{(n)j-1} + \Delta U_{i+1}) \\ &\quad - \Delta \sigma_i t_i + \Delta \sigma_{i+1} t_{i+1} - \Delta f_i(U_i^{(n-1)}, \Delta U_i^{(n)j-1} + \Delta U_i) \dots\dots\dots (35) \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta f_i(U_i^{(n-1)}, \Delta U_i^{(n)j-1} + \Delta U_i)$ を $\Delta f_i(U_i^{(n-1)}, \Delta U_i^{(n)j-1})$ で近似すると、式(34)および式(35)より次式が成立する。

$$\begin{aligned} R_i^{(n)j-1} &= -k_i \Delta U_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) \Delta U_i \\ &\quad - k_{i+1} \Delta U_{i+1} \dots\dots\dots (36) \end{aligned}$$

ここでは式(12)の場合と同様に、係数 γ ($0 < \gamma < 1$) を導入し、不釣り合い力の一部を使って補正することにする。

$$\begin{aligned} & -k_i \Delta U_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) \Delta U_i - k_{i+1} \Delta U_{i+1} \\ & = \gamma R_i^{(n)j-1} \dots\dots\dots (37) \end{aligned}$$

すべてのアンカー($i=1 \sim N$)について力の釣り合いを考えると、最終的に次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} (k_1 + k_2)\Delta U_1 - k_2\Delta U_2 &= \gamma R_1^{(n)j-1} \\ \dots\dots\dots \\ -k_i\Delta U_{i-1} + (k_i + k_{i+1})\Delta U_i - k_{i+1}\Delta U_{i+1} \\ &= \gamma R_i^{(n)j-1} \\ \dots\dots\dots \\ -k_N\Delta U_{N-1} + (k_N + k_{N+1})\Delta U_N &= \gamma R_N^{(n)j-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (38)$$

式(38)は $\Delta U_i (i=1\sim N)$ についての N 元連立一次方程式であり、これを解いて補正変位 ΔU_i を求める。

増分 n ステップにおける、反復 j ステップの最終状態における変位増分は次式により与えられる。

$$\Delta U_i^{(n)j} = \Delta U_i^{(n)j-1} + \Delta U_i \quad (i=1\sim N) \quad \dots\dots (39)$$

変位増分 $\Delta U_i^{(n)j}$ を用いて反復 j ステップにおける不釣り合い力 $R_i^{(n)j}$ を計算し、収束の判定は次式で行う。

$$\left| \frac{R_i^{(n)j}}{\Delta f_i(U_i^{(n-1)}, \Delta U_i^{(n)j})} \right| \leq \epsilon_{\max} \quad (i=1\sim N) \quad \dots\dots\dots (40)$$

$\epsilon_{\max}$ ：許容誤差

式(40)を満足した場合に収束したと考える。このとき、増分 n ステップの最終状態におけるアンカー変位は次式で与えられる。

$$U_i^{(n)} = U_i^{(n-1)} + \Delta U_i^{(n)j} \quad (i=1\sim N) \quad \dots\dots\dots (41)$$

式(40)を満足しないときは反復 $j+1$ ステップに進み、収束するまでこの過程を繰返す。

3. 計算結果

3.1 アンカーの数による収束性の検討 ここで考えている解析は、アンカーが多数あるシステムの中で、1箇所のライナが最初から曲がっているモデルについて取扱っている。これより、十分多数のアンカーを考える必要があるが、実際には図2に示したように、有限な N 個のアンカーにより解析を行うことになる。そこでここでは、アンカーの数による解の収束性の検討を行った。

図5 アンカーの荷重-変位関係

<解析モデル>

真直ぐなライナ

板厚：9.53 mm, 長さ：533 mm

ヤング率：206 GPa, 圧縮応力：295 MPa

アンカー

径の異なる2種類の点アンカー

アンカー1：直径 $D=12.7$ mm

アンカー2：直径 $D=19.1$ mm

荷重-変位関係 図5⁽²⁾

アンカーピッチ：267 mm

ベントプレート

板厚：9.53 mm, 剛性：零

<解析ケース>

ケース1：アンカー1および2が交互に配置されている場合

ケース2：アンカー1のみの場合

ケース3：アンカー2のみの場合

いずれもアンカーの数 $N=4\sim 40$ と変化させ、また、ベントプレートは中央に配置した。

解析には、2.1節に示した反復法を用い、 $\gamma=0.1$, $\epsilon_{\max}=0.01$ で計算を行った。

図6に、ベントプレートに隣接するアンカーの変位を示す(アンカーの変位は、ベントプレートに向かう方向を正として示してある)。この図より、解析ケースおよびアンカーの径によって異なるが、 $N=30$ 以上でほぼ収束していることがわかる。また、ケース1のアンカー1, 2の変位は、ケース2およびケース3の場合の変位の間にすることが確認される。

3.2 解法の比較 2章に示した各解法の比較を行うために、同じ問題について三つの解析方法により計算を行った。解析モデルは3.1節のケース3と同じものであり、アンカーの数 $N=10\sim 40$ と変化させて計算を実施した。

3.2.1 反復法 計算は、不釣り合い力補正係数 γ

図6 アンカー変位とアンカー数の関係

表 1 アンカー変位

(Unit : mm)

N	Iterative method				Incremental method	Combined method			
	$\gamma = 0.5$		$\gamma = 0.1$			2 Increments		5 Increments	
						$\gamma = 0.5$	$\gamma = 0.1$	$\gamma = 0.5$	$\gamma = 0.1$
	ϵ_{max}		ϵ_{max}			ϵ_{max}	ϵ_{max}	ϵ_{max}	ϵ_{max}
	0.05	0.005	0.05	0.005		0.005	0.005	0.005	0.005
10	2.422 (5)	2.385 (9)	2.430 (28)	2.387 (49)	2.382 [10]	2.385 (17)	2.385 (106)	2.385 (44)	2.385 (239)
20	2.830 (7)	2.824 (10)	2.832 (42)	2.827 (57)	2.824 [10]	* (500)	2.827 (101)	* (500)	2.827 (226)
30	* (500)	* (500)	2.842 (43)	2.837 (66)	2.837 [10]	* (500)	2.837 (127)	* (500)	2.840 (371)
40	* (500)	* (500)	2.837 (63)	2.837 (81)	2.837 [10]	* (500)	* (500)	* (500)	* (500)

* : Not converged . () : Number of iterations . [] : Number of increments

図 7 アンカー変位と増分ステップ数の関係

図 8 アンカーの荷重-変位関係

を 0.5, 0.1, 許容誤差 ϵ_{max} を 0.05, 0.005 と変化させて実施した。表 1 にベントプレートと隣接するアンカーの変位, および収束に要した繰返し数を示す。この表より, $\gamma=0.5$ の場合, 収束に要する繰返し数は少ないが, アンカーの数 N が大きくなると収束しなくなること, また, $\gamma=0.1$ の場合には N が大きくなると収束に要する繰返し数が増加することがわかる。収束の判定には式(16)を採用したが, N が大きくなると収束し難くなることは, 式(16)の分母に各アンカーの荷重 f を用いていることと関係している。すなわち, アンカーの数が増えると, ベントプレートから離れたアンカーはほとんど変位しなくなり, それに伴い, アンカーの荷重 f が小さくなり, 相対誤差が大きくなるためと考えられる。

3・2・2 増分法 アンカーの数 $N=20$ の場合に於いて, 増分ステップ数を 1~20 まで変化させて計算を行い, 増分ステップ数による解の収束性の検討を行った。図 7 に, ベントプレートに隣接するアンカーの変位を示す。この図より, 増分ステップ数 10 で収束した解が得られることがわかる。

増分ステップ数を 10 とし, アンカーの数 N を 10~40 まで変化させて計算した結果を表 1 に示す。この表より, 増分ステップ数がわずか 10 で, 繰返し数数

十の反復法による結果と対応する結果が得られることがわかる。

3・2・3 併用法 増分ステップ数を 2 および 5, 不釣合い力補正係数 γ を 0.5, 0.1, 許容誤差 ϵ_{max} を 0.005 として計算した結果を表 1 に示す。この表において, 併用法の繰返し数とは, 各増分ステップにおける繰返し数の和を表している。この表より, 反復法(増分ステップが 1 に相当)で収束していた条件でも増分ステップを増やすと収束しなくなる場合があること, また, 増分ステップ数が増加するだけ収束に要する繰返し数が増加していることがわかる。これより, 増分の中で反復する併用法は, 反復法と比べて有効ではないことがわかる。

3・3 異なる寸法のアンカー混在の影響 ここでは, 異なる寸法のアンカーが混在する場合の影響について検討する。アンカーとしては, 点アンカーを考え, 径が小さいアンカー(アンカー 1)と径が大きいアンカー(アンカー 2)が交互に配置され, ベントプレートが中央にあるモデルについて解析を行った。また比較のために, アンカー 1 およびアンカー 2 だけの場合についての解析も行った。アンカーの数としては, 図 6 より $N=30$ とした。点アンカーとしては径 10, 30, 50

mm のものを考え、赤尾ら⁽⁶⁾が提案した式により荷重-変位関係を計算した。これを図 8 に示す。また解法としては増分法を採用し、増分ステップ数 20 で計算を行った。

真直ぐなライナの寸法、材料定数としては以下の値を採用した。

板厚： $t=6\text{ mm}$

長さ(アンカーピッチ)： $L=500\text{ mm}$

ヤング率： $E=206\text{ GPa}$

ベントプレートの板厚、長さおよびヤング率は、真直ぐなライナと同じとし、降伏応力としては以下の値を採用した。

降伏応力： $\sigma_y=250\text{ MPa}$

初期不整の振幅は、板厚の半分 3mm とし、また荷重-変位関係の計算には Plastic-Hinge Model Method⁽³⁾を用いた。

解析は、 $D_1=10\text{ mm}$ (D_1 : アンカー 1 の径)、 $D_2=30\text{ mm}$ (D_2 : アンカー 2 の径)、 $D_1=10\text{ mm}$, $D_2=50\text{ mm}$, および $D_1=30\text{ mm}$, $D_2=50\text{ mm}$ の 3 ケースについて、真直ぐなライナへ圧縮応力を 250 MPa まで負荷して実施した。

図 9 アンカー変位とライナの圧縮応力の関係

図 10 アンカー変位とライナの圧縮応力の関係

図 9～図 11 に、上記 3 ケースについて、ベントプレートに隣接するアンカーの変位の圧縮応力による変化を示す(アンカーの変位は、ベントプレートに向かう方向を正として示してあり、また、図中の○-□の数字は、それぞれアンカーの径を示している)。これらの図には、アンカー 1 のみ、およびアンカー 2 のみの場合の結果も示してある。異なる径のアンカーが混在する場合、径の小さなアンカー 1 のほうがアンカー 2 よりも変位が大きいこと、アンカー 1、アンカー 2 とも、 D_2 が大きくなるに従って変位が小さくなること、どちらの変位もアンカー 1 だけ、およびアンカー 2 だけの場合の変位の間となることがわかる。これより、径が異なるアンカーが混在する場合でも、すべてのアンカーの径が小さいと考えると計算を行えば大きめの変位が得られることが確認される。

4. 結 言

コンクリート製容器のライナ・アンカー解析においては、非線形連立方程式を解く必要があるが、ここでは解法として反復法、増分法、および増分法と反復法を併用した方法について考え、解法による比較を行った。反復法はアンカーの数が増えると収束しなくなる可能性があること、併用法は、反復法よりも収束性が悪いこと、また、増分法は少ないステップ数で収束した解が得られ最も有効であることがわかった。

また、異なる寸法のアンカーが混在する場合の影響について検討した。径の小さい点アンカーと径の大きい点アンカーが交互に配置されている場合についての計算結果より、径の小さいアンカーのほうが変位が大きいこと、また、すべてのアンカーの径が小さいと考えると計算した場合のほうが、大小の径のアンカーが混在している場合よりも変位が大きくなることがわかった。

図 11 アンカー変位とライナの圧縮応力の関係

文 献

- (1) 大矢・酒井・石田・田中・竹村・淵元・久保, PC製円筒容器内面の鋼製ライナ・アンカー設計法, 機論, 59-559, A (1993), 822.
- (2) Doyle, J. M. and Chu, S. L., Some Structural Considerations in the Design of Nuclear Containment Liners, *Nucl. Eng. Des.*, 16-3(1971), 294.
- (3) Winstead, T. L., Burdette, E. G. and Armentrout, D. R., Liner Anchorage Analysis for Nuclear Containments, *Proc. ASCE, J. Struct. Div.*, 101-10(1975), 2103.
- (4) Gürbüz, O., Lee, T-T. and Johnson, K. L., Analysis of PCRVL Liners by the Initial Stress Method, *Nucl. Eng. Des.*, 30-2(1974), 269.
- (5) Scheele, J., Ramm, W., Fröning, H. and Becker, G., Behaviour and Interaction of Different Anchors for Liner Anchorage, *Trans. 10th SMiRT.*, H(1989), 7.
- (6) Young, A. G. and Tate, L. A., Design of Liners for Reactor Vessels, *Proc. 1st Conf. Prestressed Concrete Pressure Vessels*, (1967), 671.
- (7) Moon, Y. I., Design of a Steel Liner against Rupture, *Nucl. Eng. Des.*, 65-3(1981), 431.
- (8) 赤尾・栗田・平城, 頭付きスタッドの押抜き挙動に及ぼすコンクリートの打込み方向の影響, 土木学会論文集, No. 380(1987), 311.