

電子計算機による汎用井筒基礎の設計

清水建設株式会社

和田孝史

清水建設株式会社

尾崎 明

清水建設株式会社 正会員

○小林公博

1. まえがき

鋼管矢板井筒を中心とした井筒基礎工法は、過去10数年間の施工技術の積重ねにより、順調な発展を示している。設計計算法においても、各種の研究と実験により、土の弾塑性を考慮した弾性支床上のはり理論を中心に一応の体系化がなされ、電子計算機の利用による設計計算プログラムが各社¹⁾²⁾によって開発されているようである。当社においても、昭和48年、鋼管矢板井筒基礎設計計算プログラムとして開発され、今日まで多くの設計計算に使用されてきた。しかし、その後の鋼管矢板井筒基礎の解析技術や施工技術の進歩により、当初、設計計算プログラムに設定しなかった種々の問題が発生し、プログラム修正の必要が生じた。そこで、H型钢矢板井筒やコンクリートケーソンの設計計算をも含めた汎用井筒基礎設計計算プログラムの開発を新たに行なった。ここでは、今回開発した汎用井筒基礎設計計算プログラムのプログラムシステムを中心にその理論的考察や数値計算例について述べる。

2. 計算理論の概要

井筒基礎の設計計算理論は、一般に地盤を弾性支床と考えたはりの式として確立され広く設計計算に使用されている。ここにおいても同様の理論を使用するものとし、その概要について説明する。

図-1に示される井筒基礎をはり状の構造物とみなし、そのせん断変形が曲げ変形に比較して無視できるとすれば、井筒基礎の基本式は各領域に対してそれぞれつぎのように表わされる。

1) 地上部および塑性域

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + Px + Q = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $Px+Q$ は分布荷重、 EI は井筒の剛性である。

式(1)の一般解は、

$$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D + \frac{P}{120EI} x^5 + \frac{Q}{24EI} x^4 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 A, B, C, D は未定係数である。

2) 弾性域

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + K_h D y = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 K_h は水平方向地盤反力係数、 D は井筒幅である。

式(3)の一般解は、

$$y = e^{\beta x} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\beta = \sqrt[4]{\frac{K_h D}{4EI}}$ である

また、井筒の断面力および変位はそれぞれつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{井筒の変位} \quad \delta = y \\ \text{たわみ角} \quad \theta = \frac{dy}{dx} \\ \text{曲げモーメント} \quad M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

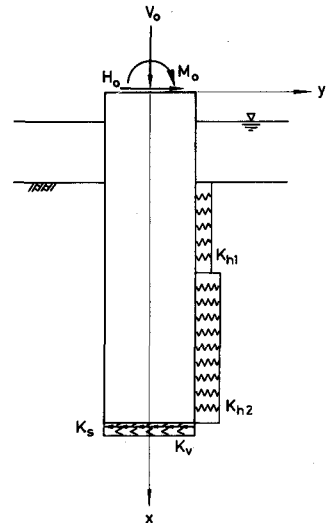


図-1 模式図

$$\left. \begin{array}{l} \text{せん断力} \\ S = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} \end{array} \right\}$$

つぎに、井筒基礎の頭部、底部の境界条件として、自由、ヒンジ、固定を考えるとそれぞれつぎのように表わされる。

1) 井筒頭部境界条件

a) 自由

$$\left. \begin{array}{l} M = -M_0 \\ S = -H_0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

b) ヒンジ

$$\left. \begin{array}{l} M = 0 \\ S = -H_0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

c) 固定

$$\left. \begin{array}{l} \theta = 0 \\ S = -H_0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 M_0 、 H_0 は井筒頭部に作用する外力である。

2) 井筒底部境界条件

a) 自由

$$\left. \begin{array}{l} M_R = K_v \theta \{ a^4 \nu_2(\beta, a, b) - a_0^4 \nu_2(\beta_0, a_0, b_0) \} \\ S_R = K_s \delta \{ A(\beta, a, b) - A(\beta_0, a_0, b_0) \} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 M_R は地盤の鉛直反力によるモーメント、 S_R はせん断バネによる水平反力、 K_v は地盤の鉛直反力係数、 K_s はせん断バネ係数、 $\nu_2(\beta, a, b)$ および $A(\beta, a, b)$ は各形状により定まる定数である。

b) ヒンジ

$$\left. \begin{array}{l} \delta = 0 \\ M = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

c) 固定

$$\left. \begin{array}{l} \delta = 0 \\ \theta = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

以上の各領域に対する一般解に各境界条件式と連続条件式を適用し、連立一次方程式を解くことにより、未定係数が決定される。決定された未定係数を使用して各点における断面力や変位が決定されるが、この際、弾塑性や浮上りの問題については、その解析結果から判断せねばならず、これらの条件を満足するまで仮定を変え繰返す必要がある。各点における断面力が決定されたならば、その結果を使って各点における応力の計算ができる。

3. プログラムシステムの概要

最近のプログラムシステムの開発では、そのプログラムシステムの総ステップ数が10万ステップを越えるプログラムシステムもさほど目新しいものではなく、なおその傾向は増加の一途である。このような中で、プログラムシステムの開発において重要な問題は、そのプログラムシステムの規模、開発期間、開発人員等の設定であろう。特に、開発期間と開発人員の問題は、互いに相反する問題であり不適切な期間と人員での開発は、その開発過程において何らかの障害が発生し、結局目的とするプログラムシステムの規模の縮小や開発期間の延長を行なうことになるものである。そのような環境下で設定された条件を満足するプログラムシステムをより短い開発期間とより少ない開発人員で完成させるためには、そのプログラムシステムの設計計画段階において以上の問題を充分考慮し適切な設定を行なうことが必要であろう。

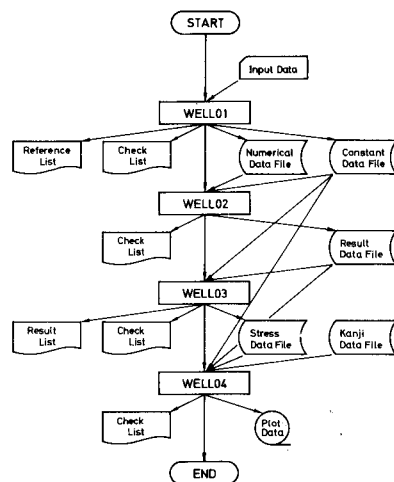


図-2 システムフロー

井筒基礎設計計算プログラムの開発に当っては、以上の問題とこのプログラムシステムの完成後の運営方法を考慮し、つぎのようなプログラムシステムの設計を行なった。図-2はこの井筒基礎設計計算プログラムのシステムフローである。図-2においてわかるように、この井筒基礎設計計算プログラムはプログラム全体の各部の機能を明確化しその機能別の小プログラム間を各々のファイルを通して結合する構造となっている。このプログラムシステムの構造により、各プログラムは、その処理の単位が小さくなり処理内容が明確となるとともに、プログラムの作成も容易となる。また、各プログラムの規模が小さくなることにより電

子計算機において必要とする記憶容量も減少することが考えられる。これに対し、このようなプログラムシステムでは、多くのファイルを必要とするためディスクやテープ等の他の媒体を必要とする。また、各プログラムがそれ自身で完結しているため、プログラムシステム全体の規模が少し大きくなり、実行時間も少し増加する等の問題もある。井筒基礎設計計算プログラムにおける各機能別プログラムの機能および処理内容はつぎのようである。

1) WELLO1……設計者により与えられたインプットデータを読み込みインプットチェックを行なう。インプットチェック後正常なデータについては、井筒各部の断面二次モーメント、分布荷重、土圧等の解析および図化に必要なデータを計算するとともに、各ファイルを作成する。主なインプットチェック項目をつぎに示す。

- a) インプットのカードフォーマットチェック
- b) インプットカードの英数字のチェック
- c) インプットカードの抜け不足のチェック
- d) インプット項目の内容の妥当性のチェック

2) WELLO2……弾性支床の上のはりの基礎微分方程式の厳密解を土に関する弾塑性理論を考慮し解析する。プログラムに当っては、連続条件式と境界条件式によって得られる係数マトリックスがバンドマトリックスであることを考慮し、プログラム容量の減少と実行時間の短縮を図る。計算の結果得られた未定係数を用いて各点における断面力を計算しファイルを作成する。

3) WELLO3……断面力の与えられた各点について応力の計算を行なう。計算した応力度より最大応力度および最大せん断応力度とその発生する位置を決定する。インプットデータおよび計算結果を出力形式に従って出力する。図化用のファイルを作成する。

4) WELLO4……必要なデータを各ファイルから読み込み図化模式に従って図化を行なう。

4. 連立一次方程式の解法

2. の計算理論の概要からもわかるように、井筒のようなはり状の構造物の微分方程式を解く場合、連続条件式と境界条件式によって与えられる未定係数の係数マトリックスは、その性質上図-3に示すようなバンドマトリックスとなっている。このような係数マトリックスをそのまま正方マトリックスとして解くことは、記憶容量の点からも演算時間の点からも問題となる。ここにおいては上記の問題とこのバンドマトリックスが4行8列からなる小マトリックスの集合であることを考慮し、変形ブロックバンドマトリックス法^{*}を使用した。この方法は、図-3で示される正方マトリックスを図-4のように記憶し、ガウス消去法を適用して連立一次方程式を解く方法である。この方法の使用により、従来の正方マトリックスを使用して解いた場合と同一の解を効率よくしかも少ない記憶容量で解くことが可能である。図-5は比較のため12元~100元までの連立一次方程式を解き記憶容量と演算時間の比較を行なったものである。この結果、この方法の使用により従来の正方マトリックスを使用した場合の記憶容量で67~8%、演算時間で79~13%で解くことができ、特にマトリックスの元数が多くなる程有効な方法であることがわかる。

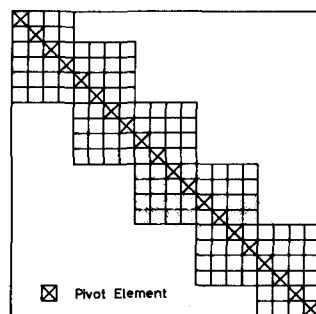


図-3 正方マトリックス

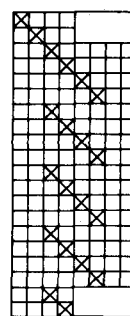


図-4 バンドマトリックス

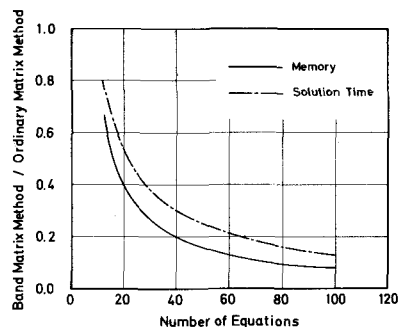
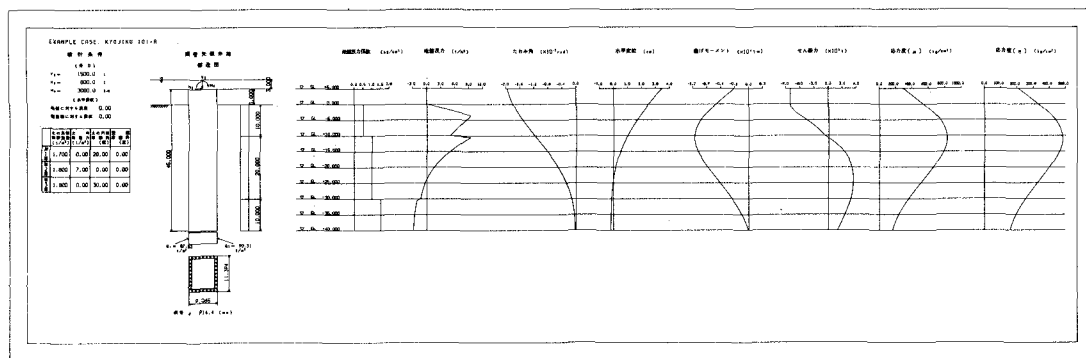


図-5 正方マトリックスとバンドマトリックスの比較

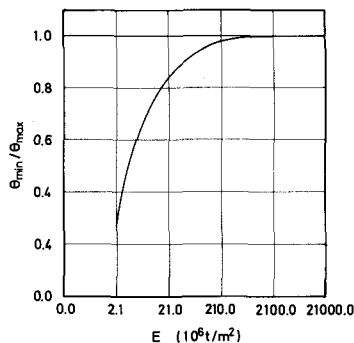
図-5は比較のため12元~100元までの連立一次方程式を解き記憶容量と演算時間の比較を行なったものである。この結果、この方法の使用により従来の正方マトリックスを使用した場合の記憶容量で67~8%、演算時間で79~13%で解くことができ、特にマトリックスの元数が多くなる程有効な方法であることがわかる。



図一 6 計算結果

5. 数値計算結果および考察

2. および 3. の理論に従って作成した井筒基礎設計計算プログラムを使用し、数値計算を行なった。図一 6 は、矩形・鋼管矢板井筒の数値計算により得られた結果の図である。この結果については、この設計法が一般に使用されている設計法であることから、特に問題もないと考えられるので、ここにおいては、このプログラムで設計の対象としているコンクリートケーソンの場合について考える。コンクリートケーソンの設計³⁾では、一般に、構造体を剛体であると考え、設計計算を行なっている。しかし、ここにおいては計算理論からも明らかのように、構造体をたわみ性構造と考え、その構造体の剛度を考慮し解析している。その結果、当プログラムによる結果は、一般に用いているコンクリートケーソンの設計計算結果とは一致しないと考えられる。図一 7 は、当プログラムでコンクリートケーソンの解析を行なった場合の弾性係数とたわみ角の変化率を示したものである。つまり剛体の場合はたわみ角の変化率は 1 となる。この図からもわかるように普通のコンクリートの弾性係数 $2.1 \times 10^8 \text{ t/m}^2$ を用いた場合はたわみ角が大きく変化することがわかる。この結果、この理論によって、剛体としてのコンクリートケーソンの設計計算を行なう場合は弾性係数として $2.1 \times 10^8 \text{ t/m}^2$ 程度を取る必要のあることがわかる。



図一 7 弾性係数の影響

6. あとがき

今回の井筒基礎設計計算プログラムの開発にあたっては、井筒基礎の設計計算理論に含まれる諸問題については触れることなく、一般に用いられている設計理論を使用し、汎用性のある井筒基礎設計計算プログラムシステムの開発に重点を置いた。しかし、これらの理論的問題、例えば、構造体のせん断変形や継手部のずれおよび土に関する土圧理論等については、今後の研究と多くの実測値との比較により解明しなければならない問題である。今後とも、これらの研究、開発を背景とした新しい井筒基礎設計計算プログラムシステムの開発が必要になるものと考えている。最後に本プログラムシステムの開発にあたり終始御指導を頂いた清水建設土木設計部次長宮崎徳次郎氏ならびにプログラム開発において協力頂いた斉藤松夫、楠本太の両氏に対し、深く感謝致します。

(参考文献)

- 1) 鋼管矢板井筒工法デザインマニュアル, 川崎製鉄株式会社
- 2) 矢板式基礎工法, 新日本製鉄株式会社
- 3) 道路橋下部構造設計指針「ケーソン基礎の設計編」, 日本道路協会

*) 変形ブロックバンドマトリックス法については、関西大学工学部三上市蔵助教授より御指導頂いた。