

矢板式基礎の一計算法

大阪第一建設部 設計課 前原 博

まえがき

矢板式基礎は、比較的新しく開発された基礎形式¹⁾で、まだその歴史は浅く、多くの施工実績がみられるようになったのは最近である。橋梁の基礎としては全国で400基以上施工されている³⁾が、阪神高速道路公団では大阪湾岸線港大橋築港側(天保山運河)で7基、南港水路橋で2基および大和川橋梁で3基施工されるに至っている。

矢板式基礎は仮締切兼用法を採用し得ることにその構造上の特徴があり、近年の施工例をみても、ほとんどが仮締切兼用法である。この工法は、矢板壁と頂版コンクリート部とが特殊な結合方法で施工されており、また、施工時の仮締切としての矢板壁が、完成後の本体構造となる。このため矢板式基礎の設計に当っては、施工時と完成後のそれぞれの状態について合理的にその挙動を評価する必要がある。

矢板式基礎の設計は、現在、道路橋示方書としての基準はなく、製鉄メーカー中心の矢板式基礎研究委員会で作成された「矢板式基礎の設計と施工指針」²⁾(昭和47年)があり、従来多くの矢板式基礎がこの指針により設計されている。上記指針における設計々算法は有限長の梁理論を基本としており、模型実験、実物の載荷試験等により計算法の適用性が検証されている。それらの矢板式基礎は径に比べて根入れ長が比較的長いものが対象とされているが、最近のように井筒径と根入れ長の比が1.0に近いものも用いられるようになってくると、そのような基礎に対しても上記指針を適用するのは問題である。

既存の現場実験の一部^{5),6)}や当公団で行った模型実験^{7,8)}の結果などから、矢板応力の評価

にあたっては、上記設計指針に示された計算法では不都合があると指摘されている。前述大和川橋梁の矢板式基礎の設計においても文献18)等を参考にして独自の設計指針を作成している。

最近、建設省土木研究所^{4,9)}を始め、製鉄メーカーの研究所等^{10,11)}で矢板式基礎に関する研究がなされ完成後の挙動について、理論的あるいは立体的な解析^{12,13,14)}や現場における施工時のデータ¹⁵⁾が発表されている。

この報告は最近の研究成果のうち、駒田、岡原の理論^{4,9,12,13)}を基に簡易化をはかり、実務的な設計々算の一手法としてまとめたものである。

1. 従来の計算法の骨子

計算法についての理解を明確にするためにここで従来の「矢板式基礎の設計と施工指針」に示されている計算法の骨子について簡単に述べる。従来の計算法では矢板式基礎の曲げ剛性を表すのに合成効率 μ を用い、また断面の応力度を求めるときには曲げモーメント分配定数 η を用い、実験的にこれらの値を決めて計算を行っている。具体的な計算法としては次の通りである。

矢板式基礎の曲げ剛性 $E I$ は次式で求める。

$$E I = E \left(\sum_{i=1}^n I_i + \mu \sum_{i=1}^n A_i y_i^2 \right) \quad (i)$$

ここに：E = 矢板の弾性定数

I = 矢板式基礎の断面二次モーメント

I_i = i 番目の矢板の断面二次モーメント

n = 矢板の本数

A_i = i 番目の矢板の断面積

y_i = i 番目の矢板の矢板式基礎中心軸よりの距離

μ = 矢板式基礎の合成効率 (0~1.0)

そして矢板式基礎の力学的モデルとして、図-1に示すモデルを想定し、基本方程式を次のように示している。

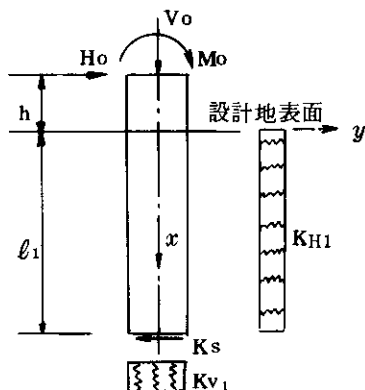


図-1

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -p \quad (ii)$$

ここに: $p = K_H D y$

K_H = 水平地盤反力係数

D = 矢板式基礎の載荷幅

y = 変位

上記の(i)、(ii)式は矢板式基礎を1本の棒モデルとしてとらえ、ハリの微分方程式を適用している。式(ii)の解は指数関数と三角関数の積の和として解かれており、境界条件を代入して、変位および断面力の計算がなされている。そして矢板の応力度の計算では次式を用いている。

$$\sigma = \frac{V_0}{n A_0} \pm M_0 \left(\frac{1 - \eta}{\sum_{i=1}^n Z_i} + \frac{\eta}{Z} \right) \quad (iii)$$

ここに、 σ : 井筒縦方向応力度

V_0 : 井筒頭部に作用する鉛直力

A_0 : 矢板1本の断面積

M_0 : 井筒頭部に作用する曲げモーメント

n : 井筒部の矢板の本数

Z_i : 各矢板の断面係数

Z : $\mu = 1.0$ とした時の井筒全体の断

面係数

η : 合成効率によって決まる曲げモーメント分配定数で例えば $\mu = 0.5$ のとき $\eta = 0.93$

式(iii)で断面の応力度を求めるが、この式では部材で分担するモーメントも井筒全体で分担するモーメントも同じ向きとなることを前提としている。この点の適応性に疑問があることがまず指摘されてきた。次に筆者の印象では根入下端の応力度の計算で、式(iii)を採用して用いると、地中部で減小したモーメントを用いて応力度を計算するため、底面での鉛直地盤反力が小さく計算される傾向にあり、支持地盤への作用力の評価のしかたに疑問を感じている。

以上の2点についてが筆者が抱いた構造のモデル化と応用上での大きな疑問点である。

2 構造のモデル化と変形の概念

矢板式基礎研究委員会の指針では矢板式基礎を弾性支承上におかれた一本の棒としてモデル化しているが、多様な形態を取り得る基礎構造に対して、これを一本の棒モデルとしてすべてを扱おうとするには多少無理があり、基礎の構造の構成形態に即したモデル化を行う必要がある。

矢板式基礎の構成を特徴づけるものの一つとして、連続的に打設された矢板壁に、隣り合う矢板の間に継手が設けられている。この継手部にモルタル等を注入して隣接矢板を一体的なものにして、矢板壁を閉合させることにより、一本の井筒体としての剛性を発揮させることを期待して、ケーソン基礎と杭基礎の中間的な剛性をもつ基礎であると考えられてきている。しかしこの継手部の処理効果の完全性とか、力学的な意味での評価について現在の段階ではまだ不明確な点が多い。構造のモデル化を考える上で、理論の簡易化のため、ここではまずこの継手処理の効果を無視するか、あるいは継手処理が行われなかったとした場合についてまず考えることにする。

矢板式基礎を頂版部と、その下の矢板の根入れ部に分けて構造をとらえた場合、頂版部は剛体と

して考え、矢板根入れ部は多数の棒部材が集合しているものとする。また、継手処理の効果を無視すると仮定すれば、群杭基礎と同じ構造モデルが想定される。このようなモデルでの変位は矢板根入れ部で起るものと考え、その根入れ部分全体についての変位は、各部材の曲げ変位、全体系としての曲げ変位およびせん断力による変位の3成分の変位が重なって生じるものと考えられる。この変位についての概念を図示したものが図-2である。このように集合している棒部材の変位について

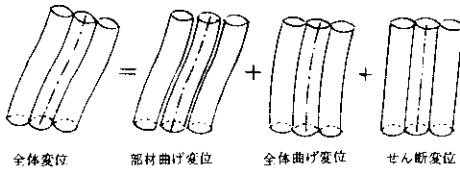


図-2 変位の概念図

て、これを3成分の変位からなると考えることは、この種の構造物に対するモデル化の考え方として画期的なことである。

この変位についての考え方を具体的な構造モデルに適用したものが図-3である。

図-3においては変位前と変位後の状態を表し

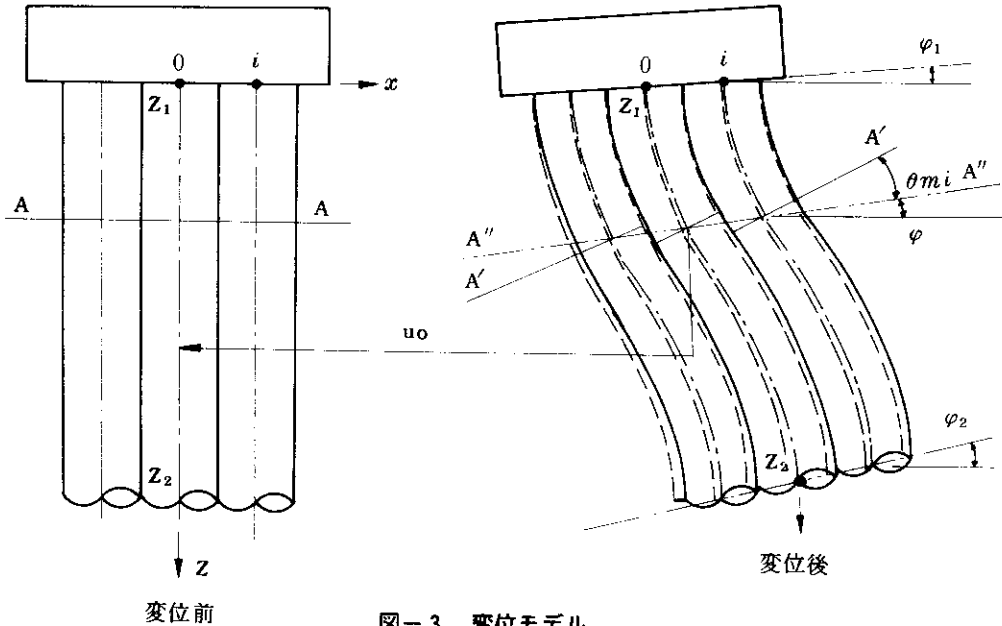


図-3 変位モデル

ているが、この図での変位の考え方は、変位前に平面A上にあった断面は、全体曲げ変位により平面A''となり、水平軸に対し角度 φ をなすと考え。次に部材曲げ変位により各部材内での断面の変化が加わり階段状の断面A'になる。面A'は面A''と部材iでは角度 θmi をなすと考え。そしてこれにせん断変形が加わると図-3の点線で示す位置から実線で示す位置に変ると考える。この場合、断面の回転角 φ 、 θmi は水平軸に対して、平行に移動して値は変わらないが、鉛直軸に対する部材の変位角にはせん断変形によるせん断変形角 θQ が加わるものとする。

なお、部材の変位量の中には先に述べた、変位の3成分のほかに剛体変位としての回転および並進運動による変位が一般的には含まれてくるので、以後変位は剛体変位成分も含めたものとして扱うことにする。

ここで以後の考察を進める上での主要な仮定条件をまとめておくと次のようになる。

- 1) 基礎構造物の変位を2次元座標で表わす。
- 2) 頂版部分は剛体として変位する。
- 3) 矢板根入部分の変位は部材曲げ変位、全体曲げ変位およびせん断変位で表わされる。

- 4) 矢板間相互の中心間距離は変位の前後で変わらない。
- 5) 各矢板の断面形も変位の前後で変わらない。
- 6) 各矢板の表面には水平力として、矢板の変位量に比列した強度の地盤反力を受けるものとする。
- 7) 各矢板の表面に作用する力について上記の地盤反力以外の作用力については無視する。

上記の仮定条件は3)の変位表示の仮定を除いては従来から使用されてきている杭基礎構造に対する設計上の仮定条件と同じ主旨の事柄ばかりである。

3. 計算式の誘導

3-1 変位とひずみの仮定

図-3に示した変位モデルについて数式上の表示を行うために、基礎の中心に原点をもつ全体座標 (x, z) を図-3に示すように設ける。

矢板根入部の任意点の x 軸および z 軸方向の変位成分 (u_i, w_i) を前節の仮定から次のようにおく。

$$\left. \begin{aligned} u_i &= u_M + u_{mi} + u_Q \\ w_i &= w_{ni} + w_{mi} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに

- u_i, w_i ; 部材 i の任意点における x 軸および z 軸方向の変位成分。
- u_{mi}, w_{mi} ; 部材 i の分担曲げモーメント m_i による x 軸および z 軸方向の変位成分。
- u_M ; 全体曲げモーメント M_G による x 軸方向の変位成分。
- w_{ni} ; 部材軸力 N_i および全体曲げモーメント M_G による z 軸方向の変位成分。
- u_Q ; せん断力による x 軸方向の変位成分。

である。なお全体曲げモーメント M_G とは部材軸力 N_i が全断面の中心軸に対してなすモーメントの総和である。

x 軸方向変位成分の z 軸方向の微分係数を次の

ようにおくことにする。

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &= \frac{\partial u_i}{\partial z} = \varphi + \theta_{mi} + \theta_Q \\ \varphi &= \frac{\partial u_M}{\partial z}, \theta_{mi} = \frac{\partial u_{mi}}{\partial z}, \theta_Q = \frac{\partial u_Q}{\partial z} \end{aligned} \right\} (2)$$

これらの値は z 軸に対するたわみ角を表すものであり、 φ および θ_{mi} は図-3に示す断面 A'' および A' の回転角に対応するものである。

ここで変位の表示についての問題点について考えてみよう。全体曲げモーメント M_G による変位については全体が仮想的な一つの曲げ部材となった場合には図-3の A'' 断面のように平面が保持された変位が生じる。しかし離散的なモデルの集合とみる場合には、各部材軸力のなすモーメントの総和が M_G であるため M_G による変位は各部材軸力による変位とみなされ、その場合は各部材軸に垂直な断面は部材間で軸力差による階段状の断面となり、部材の中心点を結ぶ仮想面が図-3の A' 断面となる。後者の場合は部材間で断面のくい違いが生じることになるが、今論理を単純化するため全体曲げモーメントに対する変位は前者のような変位をするものと仮定して考察を進めることにする。

各部材における局部座標 (ξ, ζ) を図-4に示すように設け、部材 i の中心の x 座標を x_i とする。構造全体の中心軸線の変位成分および座標を

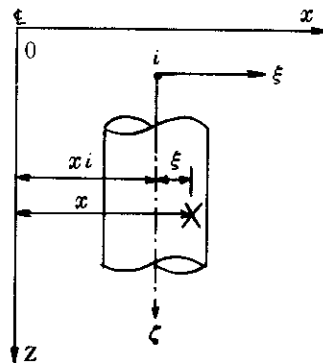


図-4 局部座標

を表す場合は添字 0 を付けて表すものとする。今各部材は等しい断面で構成されているものとして、各部材の分担モーメント m_i および分担せん断力

Q_i は各部材で近似的に等しものと仮定する。

こうした場合 $m_i \approx m_0$, $Q_i \approx Q_0$ であり $\theta m_i \approx \theta m_0$ となる。せん断力による変形角は θQ で各部材共通に表す。このとき $w_{ni} = w_{n0} - \varphi(x_i + \xi)$, $w_{mi} = -\theta m_0 \xi$ として、任意点の変位 (u_i, w_i) は全体中心軸線の変位成分を用いて次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} u_i &= u_0 \\ w_i &= w_{n0} - \varphi x_i - (\varphi + \theta m_0) \xi \end{aligned} \right\} (3)$$

また、任意点のひずみ量 ($\epsilon_{zxi}, \gamma_{zxi}$) は次のように表せる。ここで z 軸方向の微分を ' で表し、以下この表し方によるものとする。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{zxi} &= \frac{\partial w_i}{\partial z} = w_{n0}' - \varphi' x_i - (\varphi + \theta m_0)' \xi \\ \gamma_{zxi} &= \frac{\partial u_i}{\partial z} + \frac{\partial w_i}{\partial x} = \theta i + \frac{\partial w_i}{\partial x} = \theta Q \\ &= u_0' - \varphi - \theta m_0 \end{aligned} \right\} (4)$$

3-2 断面力の仮定

部材 i の断面力を (N_i, m_i, Q_i) とし、全体断面の断面力を (N, M_G, M_P, Q) と表しこれらの関係を次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} N &= \sum_i N_i = \sum_i \int_{A_i} \sigma_{zi} dA_i \\ M_G &= \sum_i x_i N_i = \sum_i \int_{A_i} \sigma_{zi} x_i dA_i \\ M_P &= \sum_i m_i = \sum_i \int_{A_i} \sigma_{zi} \xi dA_i \\ Q &= \sum_i Q_i = \sum_i \int_{A_i} \tau_{zxi} dA_i \end{aligned} \right\} (5)$$

ここに、(σ_{zi}, τ_{zxi}) は任意点に作用する垂直応力度とせん断応力度であり、 A_i は部材 i の断面を表す。また部材 i の断面 2 次モーメントを I_i として、全体断面に対する断面の定数を (A_G, I_G, I_P) としこれらを次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} A_G &= \sum_i A_i \\ I_G &= \sum_i A_i x_i^2 \\ I_P &= \sum_i I_i \end{aligned} \right\} (6)$$

ここで考察を単純化する意味で各部材は等しく、各部材での m_i, Q_i, A_i, I_i および弾性定数 (E, G) は等しいものと仮定する。部材 i の断面力は式(5)、(6)を用いると次のようになる。

$$\left. N_i = A_i \left(\frac{N}{A_G} + x_i \frac{M_G}{I_G} \right) \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} m_i &= I_i \frac{M_P}{I_P} \\ Q_i &= A_i \frac{Q}{A_G} \end{aligned} \right\} (7)$$

3-3 釣合式と基本方程式

図-5 に示す微小要素について、部材に垂直な

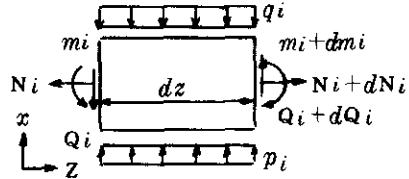


図-5 要素モデル

分布力 p_i, q_i が作用した場合の断面力の釣合は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_i}{dz} &= N_i' = 0 \\ \frac{dm_i}{dz} &= m_i' = Q_i \\ \frac{dQ_i}{dz} &= Q_i' = q_i - p_i \end{aligned} \right\} (8)$$

式(5)を z で微分し式(8)を代入する。ここで $q = \sum_i q_i$ とし、 p_i については簡単化のため省略すると次式となる。

$$\left. \begin{aligned} N' &= \sum_i N_i' = 0 \\ M_G' &= \sum_i x_i N_i' = 0 \\ M_P' &= \sum_i m_i' = \sum_i Q_i = Q \\ Q' &= \sum_i Q_i' = q \end{aligned} \right\} (9)$$

ここで $\sigma_{zi} = E \epsilon_{zxi}$, $\tau_{zxi} = G \gamma_{zxi}$ から式(4) および(6)を用いて式(5)の断面力は次のように変位で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} N &= E w_{n0}' \sum_i A_i = E A_G w_{n0}' \\ M_G &= -E \varphi' \sum_i A_i x_i^2 = -E I_G \varphi' \\ M_P &= -E (\varphi + \theta m_0)' \sum_i I_i \\ &= -E I_P (\varphi + \theta m_0)' \\ Q &= G (u_0' - \varphi - \theta m_0) \sum_i A_i \\ &= G A_G (u_0' - \varphi - \theta m_0) \end{aligned} \right\} (10)$$

式(10)を式(9)に代入すると次の方程式が得られる。

$$E A_G w_{n0}'' = 0$$

$$\left. \begin{aligned} -E I_G \varphi'' &= 0 \\ -E I_P (\varphi + \theta_{m0})'' - G A_G \cdot \\ &\quad (u_0' - \varphi - \theta_{m0}) = 0 \\ G A_G (u_0' - \varphi - \theta_{m0})' - q &= 0 \end{aligned} \right\} (11)$$

上式は構造体の中心線の変位関数 ($w_{n0}, \varphi, \theta_{m0}, u_0$) を未知数とした連立微分方程式である。この式は群杭的なモデルとした場合の基本釣合方程式と考えることができる。

3-4 実用的な一般解と釣合条件式

3-4-1 気中構造体の一般解と釣合条件式

気中構造体としては矢板式基礎が地盤より突出した部分を想定したものである。この場合式(11)の $q=0$ として一般解と釣合条件式を求めると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{一般解;} \\ w_{n0} &= A_1 Z + A_0 \\ \varphi &= B_1 Z + B_0 \\ \theta_{m0} &= C_2 Z^2 + C_1 Z + C_0 \\ u_0 &= D_3 Z^3 + D_2 Z^2 + D_1 Z + D_0 \end{aligned} \right\} (12)$$

ここに、 $A_0, A_1, B_0, B_1, C_0, C_1, C_2, D_0, D_1, D_2, D_3$ は積分定数であり、この定数間には次の釣合条件が必要である。

$$\left. \begin{aligned} \text{釣合条件式;} \\ 3D_3 - C_2 &= 0 \\ 2D_2 - C_1 - B_1 &= 0 \\ 2E I_P + G A_G (D_1 - C_0 - B_0) &= 0 \end{aligned} \right\} (13)$$

3-4-2 土中構造体の一般解と釣合条件式

この場合 q は任意断面の地盤反力の総和を表すものとして、その強度は水平変位量 w に比例するものと仮定し次のようにおく。

$$q = \sum_i q_i = a K_H B u_0 \quad (14)$$

ここに、 K_H ; 水平地盤反力係数

B ; 水平地盤反力の受圧面の基準幅

a ; 基準幅 B 以外の受圧面の効果を考慮する場合の係数

さらに、一般解を求めるに当り次の係数を定義しておく。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \beta \sqrt{1+\Psi}, \quad \eta = \beta \sqrt{1-\Psi} \\ \beta &= \sqrt{\frac{4aK_H B}{4E I_P}}, \quad \Psi = \frac{\sqrt{aK_H B E I_P}}{2G A_G} \end{aligned} \right\} (15)$$

一般解は $\Psi > 1, \Psi = 1, \Psi < 1$ によって解の形が異なるが、一般的な構造物と土質条件では $\Psi < 1$ である。 $\Psi < 1$ の場合の一般解と釣合条件式を求めると次のようになる。

一般解;

$$\left. \begin{aligned} w_{n0} &= A_1 Z + A_2 \\ \varphi &= B_1 Z + B_2 \\ u_0 &= e^{\alpha z} (C_1 \sin \eta z + C_2 \cos \eta z) \\ &\quad + e^{-\alpha z} (C_3 \sin \eta z + C_4 \cos \eta z) \\ \theta_{m0} &= e^{\alpha z} (D_1 \sin \eta z + D_2 \cos \eta z) \\ &\quad + e^{-\alpha z} (D_3 \sin \eta z + D_4 \cos \eta z) - \varphi \end{aligned} \right\} (16)$$

ここに、 $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 \sim C_4, D_1 \sim D_4$ は積分定数であり積分定数間には次の釣合条件が必要である。

釣合条件式;

$$\left. \begin{aligned} \alpha (2\Psi - 1) C_1 + \eta (2\Psi + 1) \cdot \\ \quad \quad \quad C_2 + D_1 &= 0 \\ -\eta (2\Psi + 1) C_1 + \alpha (2\Psi - 1) \cdot \\ \quad \quad \quad C_2 + D_2 &= 0 \\ -\alpha (2\Psi - 1) C_3 + \eta (2\Psi + 1) \cdot \\ \quad \quad \quad C_4 + D_3 &= 0 \\ -\eta (2\Psi + 1) C_3 - \alpha (2\Psi - 1) \cdot \\ \quad \quad \quad C_4 + D_4 &= 0 \end{aligned} \right\} (17)$$

ただし、 $\Psi < 1$

3-5 境界条件

図-6に示すモデルで境界条件を考えてみる。

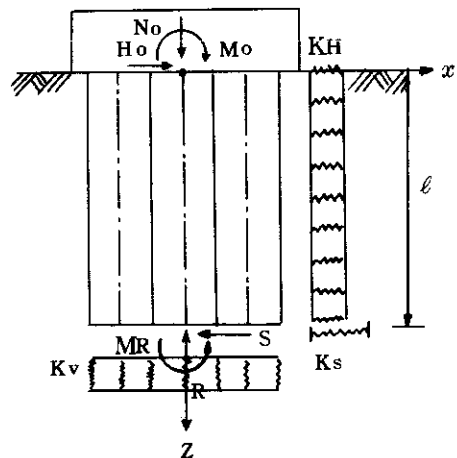


図-6 基礎のモデル

N_0, M_0, H_0 は頂版部下面に働く外力とし、 R, M_R, S は根入部下端に作用する地盤反力の合力とし、その作用方向は図-6の向きを正とする。

1) 頂版下面での境界条件 ($Z = 0$)

$$\left. \begin{aligned} N &= N_0 \\ M_G + M_p &= M_0 \\ Q &= H_0 \\ \theta_{m0} &= 0 \end{aligned} \right\} (18)$$

2) 根入部下端での境界条件 ($Z = \ell$)

$$\left. \begin{aligned} EA_G w_{no}' + K_v A_{bG} w_{no} &= 0 \\ EI_G \varphi' + K_v I_{bG} \varphi &= 0 \\ EI_p (\varphi + \theta_{m0})' + K_v I_{bp} \cdot \\ &(\varphi + \theta_{m0}) = 0 \\ GA_G (u_0' - \varphi - \theta_{m0}) \\ &+ K_s A_{bG} u_0 = 0 \end{aligned} \right\} (19)$$

ここに、

- A_{bG} ; 各部材の閉塞断面の断面積の総和
- I_{bp} ; 各部材の閉塞断面の断面2次モーメントの総和
- I_{bG} ; 閉塞断面 A_{bG} についての基礎中心に対する断面2次モーメント
- K_v ; 鉛直地盤反力係数
- K_s ; せん断地盤反力係数

特殊な場合として、根入下端の変位が拘束されている場合には境界条件は $w_{no} = 0, \varphi = 0, \theta_{m0} = 0, u_0 = 0$ となる。

境界条件は根入部の上、下端で合計8式成立し、前節の釣合条件式と連立させることにより、一般解の積分定数の値が定められる。

3-6 水平変位量の変位成分の分析

水平変位量 u_0 の成分変位 u_M, u_{m0}, u_Q について求めよう、 u_M および u_{m0} のたわみ角曲線 φ および θ_{m0} は前節までの釣合条件式および境界条件により、 w と共に決定されるので、 u_M, u_{m0}, u_Q については次のように表わされる。

$$u_M = \int \varphi dz, u_{m0} = \int \theta_{m0} dz, u_Q = \int (u_0' - \varphi - \theta_{m0}) dz \quad (20)$$

式(12)および式(16)に対して上式により計算すると次のようになる。

a) 気中構造体の場合

$$\left. \begin{aligned} u_M &= \frac{1}{2} B_1 Z^2 + B_0 Z + \bar{B} \\ u_{m0} &= \frac{1}{3} C_2 Z^3 + \frac{1}{2} C_2 Z^2 + C_0 Z + \bar{C} \\ u_Q &= (D_1 - C_0 - B_0) Z + \bar{D} \end{aligned} \right\} (21)$$

ここに $\bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$ は積分定数である。気中構造体の場合境界条件が明確な場合は変位関数は簡単に定めることができる。たとえば図-7の場合式

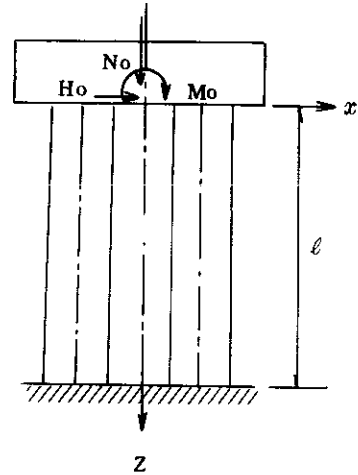


図-7

(12)の変位関数は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} w_{no} &= \frac{N_0}{EA_G} (-Z + \ell) \\ \varphi &= \frac{2M_0 + H_0 \ell}{2E(I_G + I_p)} (Z - \ell) \\ \theta_{m0} &= \frac{H_0}{2EI_p} Z(Z - \ell) \\ u_0 &= \frac{2M_0 + H_0 \ell}{4E(I_G + I_p)} (Z - \ell)^2 + \frac{H_0}{12EI_p} \cdot \\ & \quad (Z - \ell)^2 (2Z + \ell) + \frac{H_0}{GA_G} (-Z + \ell) \end{aligned} \right\} (22)$$

なお式(22)で u_M, u_{m0}, u_Q は u_0 の第1、2、3項になっている。

b) 土中構造体の場合

$$\left. \begin{aligned} u_M &= \frac{1}{2} B_1 Z^2 + B_2 Z + \bar{B} \\ u_{m0} &= \frac{1}{2\beta^2} \left[e^{\alpha z} \{ (\alpha D_1 + \eta D_2) \cdot \right. \end{aligned} \right]$$

$$\left. \begin{aligned} & \sin \eta z - (\eta D_1 - \alpha D_2) \cos \eta z \\ & + e^{-\alpha z} \{ (-\alpha D_3 + \eta D_4) \sin \eta z \\ & - (\eta D_3 + \alpha D_4) \cos \eta z \} \\ & - u_M + \bar{D} \\ u_Q & = u_0 - u_{m0} - u_{M0} + \bar{C} \end{aligned} \right\} (23)$$

ここに \bar{B} 、 \bar{C} 、 \bar{D} は積分定数である、土中構造体の場合一般的には剛体運動を拘束するような境界条件は与えられないので、式(23)の積分定数は確定しがたい。しかし関数の曲線形状は定まっております、 $Z = \ell$ での u_0 の値 $u_0(\ell)$ を平行水平移動量とみなして、 $u_M(\ell) = u_{m0}(\ell) = u_Q(\ell) = 0$ とすることにより、積分定数の値を計算することができる。

3-7 仮想仕事の原理による論理的な誘導

3-3節で図-5の微小要素の釣合から式(9)を簡単に誘導したが、文献(4)および(12)にならない仮想仕事の原理を適用して誘導してみよう。ここでは矢板相互のずれ抵抗については前節までと同じように無視して考えることにする。第2節で述べている変形概念は矢板相互のずれ変位が主として曲げ変形に起因するものと考えており、この点が文献(13)の考え方と異っている。仮想仕事の原理を応用して理論だてする事が将来の正統的な理論となるものと思われる。図-3および図-5のモデルに対し仮想仕事の原理を適用すると次式となる。

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \int_{z_1}^{z_2} \int_{\Lambda_i} (\sigma_{zi} \delta \epsilon_{zi} + \tau_{zzi} \delta \gamma_{zzi}) dA_i dz + \int_{z_1}^{z_2} (q_i - p_i) \delta u_i dz - \left[\nu_z \int_{\Lambda_i} (\bar{\sigma}_{zi} \delta w_i + \bar{\tau}_{zzi} \delta u_i) dA_i \right]_{z_1}^{z_2} \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots (I)$$

ここに n は部材の本数で $\bar{\sigma}_{zi}$ 、 $\bar{\tau}_{zzi}$ は部材 i の両端断面に働く垂直およびせん断応力度である。 ν_z は両端断面の単位法線ベクトルの Z 軸方向成分であり $-1 (z = z_1)$ 、 $1 (z = z_2)$ である。

ここで式(5)の断面力の定義を用い、またこれと同様な形式で $\bar{\sigma}_{zi}$ 、 $\bar{\tau}_{zzi}$ に対する断面力を \bar{N} 、 \bar{M}_G 、 \bar{M}_p 、 \bar{Q} を定義し、 $P = \sum_i^n P_i$ 、 $q = \sum_i^n q_i$ において、さらに式(3)、(4)を代入して式(I)を変形すると

次式となる。

$$\int_{z_1}^{z_2} \left\{ N \delta w n_0 - M_G \delta \varphi' - M_p \delta (\varphi + \theta m_0)' + Q \delta (u_0' - \varphi - \theta m_0) + (q - p) \delta u_0 \right\} dz - \left[\nu_z \left\{ \bar{N} \delta w n_0 - \bar{M}_G \delta \varphi - \bar{M}_p \delta (\varphi + \theta m_0) + \bar{Q} \delta u_0 \right\} \right]_{z_1}^{z_2} = 0 \quad \dots\dots (II)$$

式(II)に部分積分を適用すると次式となる。

$$\int_{z_1}^{z_2} \left\{ -N' \delta w n_0 + (M_G' + M_p' - Q) \delta \varphi + (M_p' - Q) \delta \theta m_0 - (Q' - q + p) \delta u_0 \right\} dz + \left[(N - \nu_z \bar{N}) \delta w n_0 - (M_G - \nu_z \bar{M}_G) \delta \varphi - (M_p - \nu_z \bar{M}_p) \delta (\theta m_0 + \varphi) + (Q - \nu_z \bar{Q}) \delta u_0 \right]_{z_1}^{z_2} = 0 \quad \dots\dots (III)$$

式(III)が恒等的に成立するためには次の条件が必要となり、これらが釣合式および境界条件となる。

$$N' = 0, M_G' = 0, M_p' - Q = 0, Q' - q + p = 0 \quad \dots\dots (IV)$$

$$w n_0 = C_1, \varphi = C_2, \theta m_0 + \varphi = C_3, u_0 = C_4 \quad (C_1 \sim C_4 : const.) \quad \dots\dots (V)$$

または

$$N = \nu_z \bar{N}, M_G = \nu_z \bar{M}_G, M_p = \nu_z \bar{M}_p, Q = \nu_z \bar{Q} \quad \dots\dots (VI)$$

式(V)、(VI)はこのうち4条件式が組合わされて具体的な構造物に対する境界条件となる。

式(I)~(III)に矢板相互のズレによる仕事量を考慮することが今後に残された構造問題に関する課題の主テーマとなっている。なお文献(13)ではせん断変形によってこのズレが生じるものとして解析がなされている。

4. 継手処理の効果を等分布摩擦抵抗力として考慮する場合

4-1 釣合式の誘導

第3節では矢板式基礎の継手処理効果は無視して考察をすすめてきた。ここでは継手処理の効果を評価する一つの便法として、継手がすべり始めようとする時の摩擦抵抗力を部材間に分布する抵抗せん断力とみなしてその効果を考えてみる。

図-8において、部材 i の微小要素の側面に抵

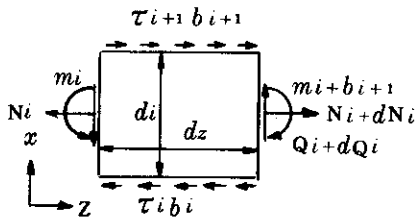


図-8

抗せん断力 τ_i が分布幅 b_i でもって作用する状態を想定する。この要素の断面力を (N_i, m_i, Q_i) とすると微小要素の釣合式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} N_i' &= \tau_i b_i - \tau_{i+1} b_{i+1} \\ m_i' &= Q_i - (\tau_i b_i + \tau_{i+1} b_{i+1}) d_i / 2 \\ Q_i' &= 0 \end{aligned} \right\} (24)$$

ここに d_i は部材の高さである。

次にこの部材が n 本重ねられた場合を想定したものが図-9である。全体断面の断面力 (N, M_G, M_p, Q) は式(5)の通り定義しており、式(5)を微分したものに式(24)を代入する。外側端部では $\tau_{n+1} b_{n+1} = 0$ であり、釣合式は次式のようになる。

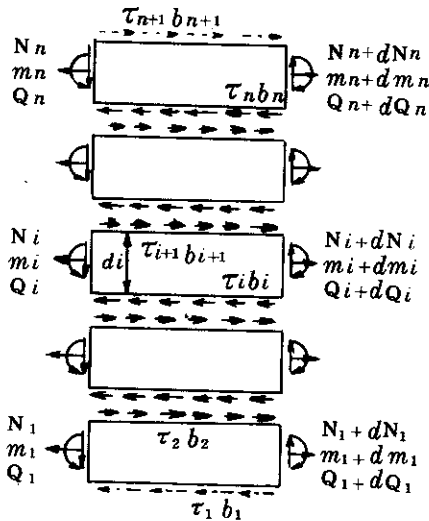


図-9

$$\left. \begin{aligned} N' &= 0 \\ M_G' &= \sum_{i=1}^n x_i (\tau_i b_i - \tau_{i+1} b_{i+1}) \\ M_p' &= Q - \sum_{i=1}^n (\tau_i b_i + \tau_{i+1} b_{i+1}) d_i / 2 \\ Q' &= 0 \end{aligned} \right\} (25)$$

ここですべての部材は等しい断面で構成されているものとし、また各部材間には等しい摩擦力が作用するものとする。このとき次のようにおく。

$\tau_i b_i = \tau_{i+1} b_{i+1} = \tau b, d_i = d_{i+1} = d$ (26)
 すると、 $\sum_{i=1}^n x_i (\tau_i b_i - \tau_{i+1} b_{i+1}) = \tau b (n-1) d$ 、また $\sum_{i=1}^n (\tau_i b_i + \tau_{i+1} b_{i+1}) b_i / 2 = \tau b (n-1) d$ となり等しくなる。これを f と表し、構造の全幅を D とおくと $f = \tau b (D-d)$ となる。 n 本の部材が1列の場合を考えてきたが、これが2列であったり、図-10の円形であったりした場合は $f = 2\tau b (D-d)$ となる。そこで f を次のようにおく。

$$f = h \tau b (D-d) \quad (27)$$

ここに、 h ; 荷重方向の壁数で決まる係数 ($h = 1, 2, 3 \dots$)

τ ; 等分布摩擦抵抗力

b ; τ の分布幅

D ; 構造物の荷重方向の奥行寸法

d ; 部材の中心間距離

であり、 $(D-d)$ は最遠部材の中心間距離を表す。

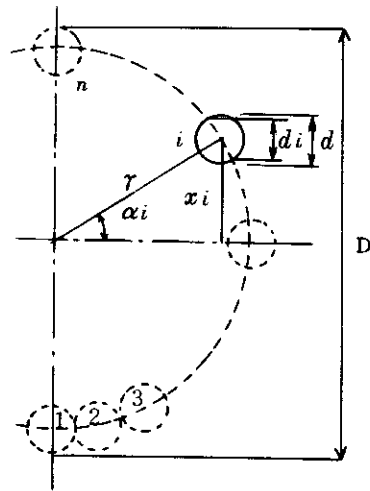


図-10

式(26)、(27)により式(25)を表すと、等分布摩擦抵抗力が働く場合の釣合式となり、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} N' &= 0 \\ M_G' &= f \\ M_p' - Q &= -f \\ Q' &= 0 \end{aligned} \right\} (28)$$

4-2 等分布摩擦抵抗力が働く場合の特殊解

式(28)に断面力の関係式(10)を代入する。式(28)では地盤反力 q を考慮していないが、その第4式に地盤反力 q を考慮すると $Q' - q = 0$ となる。式(11)に対応する摩擦抵抗力 f が働く場合の方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} EA_G w n o'' &= 0 \\ -EI_G \varphi'' &= f \\ -EI_p (\varphi + \theta m o)'' - GA_G (u_o' - \varphi - \theta m o)' &= -f \\ GA_G (u_o' - \varphi - \theta m o)' - q &= 0 \end{aligned} \right\} (29)$$

式(29)で $f = 0$ とし、 q に特定の条件を与えた時の一般解は3-4節で求めている。ここでは f が任意の定数である場合の特殊解を求めることにする。求める特殊解を $\varphi_p, \theta m o_p, u_o p$ とすると次のようになる。

a) 気中構造体の特殊解 ($q=0$)

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p &= -\frac{f}{2EI_G} Z^2 \\ \theta m o_p &= \left(\frac{f}{2EI_G} + \frac{f}{2EI_p} \right) Z^2 \\ u_o p &= \frac{f}{6EI_p} Z^3 \end{aligned} \right\} (30)$$

b) 土中構造体の特殊解 (q =式(14))

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p &= -\frac{f}{2EI_G} Z^2 \\ \theta m o_p &= \frac{f}{2EI_G} Z^2 - \frac{f}{GA_G} \\ u_o p &= 0 \end{aligned} \right\} (31)$$

なお、 f の分布については断面方向には一定の定数と考えている。しかし、部材軸方向では図-11の変形のようにずれ方向が異なる場合があり、式(30)(31)の応用に当たっては f の強度、軸方向の分布範

囲とかその向きなどに便宜的な配慮をはらう必要がある。

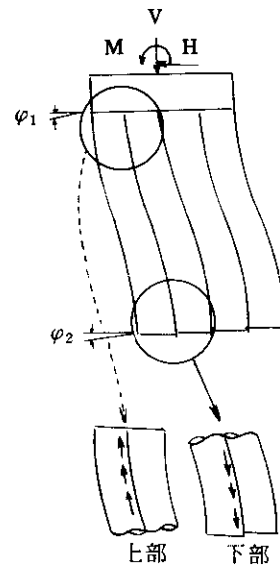


図-11 継手部摩擦抵抗の向きが変わる例

5. 考 察

本計算法は挙動が複雑である矢板式基礎を設計するうえで、できるだけ簡易化して設計々算実務に応用できるようにすることを目的としたものである。このため各矢板位置の局部変形は始めから無視している。

次に矢板式基礎の特徴である継手処理の効果に関して、継手の剛性評価の方法については従前から矢板式基礎に関する主要な課題の一つとなっている。しかし筆者は継手処理工の力学的な仕上り精度が現場では確認し難い現状から、また、既存の載荷実験の例には継手処理が力学的な期待に対して必ずしも満足されるような結果が得られておらず^{5,6)} 設計実務上は、この力学的効果は無視して扱った方が簡便であると考えている。また地盤反力係数の推定精度などの基礎工としての精度全体からみても継手処理の力学的効果は特段の有意性があるものとは考えがたいと思っている。

継手処理の目的は施工時における止水効果と水替時における揚圧力の防止に主目的があるものとする。基礎全体の剛性の確保という目的はこれを継手処理の効果に期待するのではなく、矢板を頂版に堅固に固定することに期待されるべきものと考えている。従って頂版結合部の設計は以前に増してその重要性を付与して扱ってゆきたいと考えている。

また矢板式基礎の施工性からみて根入下端近くまで継手管を設けることは必ずしも得策ではない場合がある。

本計算法では群杭的なモデルで矢板式基礎をモデル化し、天板根入部の変位成分の分析を行っていることと、比較的簡易な式で変位関数式を表示していることが特徴としてあげられる。

変位成分の分析と比較検討は今後の基礎工の評価において必ず取り扱われる事柄となるものと思われる。そして矢板式基礎のみならず多柱式および群杭的な基礎工の統一的な評価を行うための手段として本計算法は役立つものと思われる。

あとがき

本計算法の誘導については昭和50年度に行われた模型実験⁷⁾の結果に対する評価として、当時の大阪湾岸線技術委員会・下部工分科会に報告¹⁶⁾したのが始まりである。その後内容を改補した形で当公団の第9回技術研究発表会¹⁷⁾および土木学会年次学術講演会の第35・36回^{19,20)}で報告を行っている。

最後に末筆ながら、当時の大阪湾岸線技術委員会の各委員の方々をはじめ、実験等でご協力をいただいた建設省土木研究所および鋼管杭協会の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 嶋文雄・肱黒和彦；橋梁基礎の新工法－仮締切兼用鋼管矢板井筒工法－土木学会誌 vol.57 NO9, P12～19, 1972
- 2) 矢板式基礎研究委員会

矢板式基礎の設計と施工指針、昭和47年1月

- 3) 鋼管矢板工法の施工実績一覧表、基礎工 vol.3 NO3 P84, 1975；vol.8, NO8, P116～118, 1980
- 4) 建設省土木研究所
矢板式基礎と水平力に対するその構造特性
土木研究所資料 第1034号 P18～21
昭和50年3月
- 5) 榊・斉藤・中條他；実大鋼管矢板井筒（水島大橋下部工）の水平加力試験結果、第9回土質土学研究発表会 1974
- 6) 藤田・山口・木寺・島岡他
鋼管矢板井筒基礎の施工および水平載荷試験
土と基礎；vol.21, NO12, P9～15, 1973
- 7) 阪神高速道路公団・鋼管杭協会
矢板式基礎の模型実験報告書 昭和51年3月
- 8) 笹戸・山崎・江見・前原
矢板式基礎の構造特性に関する模型実験 (上)・(下)
橋梁と基礎 vol.10, NO5, P18～21；
NO6, P27～33 1976
- 9) 建設省土木研究所；矢板式基礎の設計法（その1）
土木研究所資料 第1175号 昭和52年2月
- 10) 木寺・長岡・島岡・小間；鋼管矢板井筒静的水平抵抗の有限要素解析、土木学会論文報告集、第259号 P71～81, 1977-3
- 11) 長岡・吉田・榊；鋼管矢板井筒の有限要素振動解析と野外実験結果との比較、土木学会論文報告集、第254号 P61～71 1976-10
- 12) 駒田・岡原・高尾・倉方；円筒形鋼管矢板井筒基礎の解析、土木学会論文報告集第316号 P65～76 1981-12
- 13) 倉方・岡原・浅沼；鋼管矢板式基礎の設計法に関する一試案(上)・(下)、橋梁と基礎 vol.16 NO4 P21～26, NO5 P38～42, 1982
- 14) 嶋・植木・行友・森川；鋼管矢板井筒基礎の立体骨組構造としての設計法
橋梁と基礎、vol.16, No.2 P30～37 1982
- 15) 嶋・植木・行友・森川；仮締切り兼用鋼管矢

板井筒基礎の仮締切り壁設計法

橋梁と基礎、vol 15 No.12 P 18~24 1981

- 16) 阪神高速道路公団大阪湾岸線技術委員会、
第14回下部工分科会資料、No.14-3、矢板式
基礎模型実験結果の評価と設計々算法に対す
る検討、昭和51年3月
- 17) 江見・前原；矢板式基礎の模型実験(その3)
阪神高速道路公団第9回技術研究発表会論文
集 P 79~86,昭和52年1月
- 18) 安治川橋梁矢板式基礎設計指針(案)；阪神高
速道路公団大阪第三建設部、昭和51年3月
- 19) 前原・江見；矢板式基礎の設計々算法に関す
る考察、第35回土学年次講演概要集第Ⅲ部
P 410~411,昭和55年9月
- 20) 前原；矢板式基礎の設計々算法に関する考察
(続)、第36回土学年次講演概要集第Ⅲ部、
P 566~567,昭和56年10月