

III-A 251

多基礎構造物の支持力に関する一考察

京都大学工学部 正会員 小林俊一

1. はじめに 複数の独立な浅い基礎を有する構造物の例として、ジャッキアップ式の海底油田のリグや3脚式の海洋重力式構造物などが挙げられる。これらの構造物は設置される外的環境が厳しく、常に繰返し波力が載荷するため、支持力を的確に評価する事が重要となる。Murff¹⁾は単独基礎の挙動を荷重～変位で表現したマクロエレメントの概念を用いて多基礎構造物の極限解析を行っている。ここでは、マクロエレメント法にシェイクダウンの概念を適用して、繰返し荷重に対する支持力を評価する方法について検討した。

2. 支持力の評価法 多基礎構造物では、上部構造に載荷する荷重がどのような分担比で下部基礎に載荷するかを評価する必要がある。ここでは図1に示すような3脚式の重力式海洋構造物を例にとり、支持力を評価する方法について検討する。ここでは簡単のため上部構造と脚部、下部基礎をヒンジ結合とした。この仮定の下では、不静定トラスの計算を応用して下部基礎に載荷する荷重を容易に評価できる。さて、各基礎は脚部とヒンジ結合されているのでモーメント荷重は作用せず、鉛直および水平荷重のみが伝達される。系が弾性的な応答するとき、各基礎に載荷する荷重は以下のように表せる。なお上添字 E は弾性応答を表す。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} V_A^E \\ H_A^E \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{3\sqrt{3}}{8+6\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{3}{8+6\sqrt{3}} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_V \\ F_H \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} V_B^E \\ H_B^E \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{4+3\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_V \\ F_H \end{Bmatrix}, \\ \begin{Bmatrix} V_C^E \\ H_C^E \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{3\sqrt{3}}{8+6\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{3}{8+6\sqrt{3}} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_V \\ F_H \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

一方、この構造物全体としては一部の基礎が非弾性応答を示すような弾塑性挙動を考慮した支持力を考えるべきである。ここで、以下のような仮定を設けて全体系の支持力を評価する。

- ・基礎の支持力は荷重空間（鉛直荷重 V 、水平荷重 H 、モーメント荷重 M/B ）内の支持力曲面として $f(V, H, M/B) = 0$ のように表せる。ここに B は基礎幅。
- ・荷重レベルが支持力曲面の内部にあるとき、基礎は弾性的に応答する。
- ・支持力曲面は荷重空間に固定されており、大きさも不変である。したがって基礎の荷重～変位曲線は弾・完全塑性体と同様になる。
- ・各々の基礎は独立に挙動し、互いの干渉を受けない。

支持力曲面としては、この系では常にモーメント荷重が $M = 0$ であることを考慮し、Houlsby らの実験式²⁾を援用する。

$$\left(\frac{H}{H_m}\right)^2 = 16 \left(\frac{V}{V_m}\right)^2 \left(1 - \frac{V}{V_m}\right)^2 \quad (2)$$

ここに V_m は鉛直方向の極限支持力、 H_m は水平方向の極限支持力を表す。例えば非排水状態の粘土地盤を考えれば、 $V_m = (\pi + 2)kB$ 、 $H_m = kB$ (k は剪断強度、 B は基礎幅) である。この支持力曲面はマクロエレメントとして基礎を見たときの降伏基準に相当する。

弾性限界を超える荷重が作用するときには、ゼロ外力に釣合う時間によらない残留荷重を考え、各基礎において弾性荷重（添字 E ）と残留荷重（添字 R ）の和が支持力曲面内に収まっておれば系は崩壊しない。これはシェイクダウンの静力学定理（メランの定理）³⁾の帰結である。この定理は繰返し載荷に対しても成立する事に注意する必要がある。基礎の支持力曲面と載荷経路を図2に示す。本問題では常に鉛直・水平の割合が一定の傾斜荷重が載荷するため、各脚に働く軸力 N_X に関する条件式を用いて、

$$0 \leq N_A, N_C \leq 1.54kB, \quad 0 \leq N_B \leq 5.14kB \quad (3)$$

を満たす最大荷重を求める問題に帰着する。ここに、各脚に載荷する軸力は弾性応答とゼロ外力に釣合う残留軸力（不静定力）の和 $N_X = N_X^E + N_X^R$ である。

あとは線形計画法を用いて最適解を求めれば良い。ここでは鉛直荷重を固定して、最大の水平荷重を求めた。求めた系の支持特性を図3に示す。

3. 考察 ここで取り上げた3脚式の重力式海洋構造物の場合、最大水平支持力は弾性限界、塑性限界ともほとんど差がないが、塑性限界は広いレンジの鉛直荷重の下で安定した水平支持力が期待できるのに対して、弾性限界では鉛直荷重レベルの変化に伴い水平支持特性が大きく変化することが分かる。また波浪荷重のように、一定の鉛直荷重下で振幅一定の両振り水平荷重が載荷する場合も、全く同じ手順の解析となり、この塑性限界荷重とシェイクダウン限界荷重が一致することも分かる。

本解析の考え方は重力式海洋構造物のみならず、例えば抑止杭とケーブルで係留された大規模浮体構造物の支持力問題などに直接拡張することが可能である。また上部構造の曲げ剛性を考慮した解析に応用することもできる。ただし、一般的にはマクロエレメントで表現した基礎の挙動が非線形であることに注意する必要があり、その具体的な解析は今後の課題である。

参考文献 1) Murff, J. D. : Comp. Meth. and Adv. in Geomech., vol. 1, pp. 233-244, 1994. 2) Houlsby, G. T. : Predictive Soil Mechanics, Thomas Telford, pp. 339-358, 1993. 3) 例えば Martin, J. B. : Plasticity, The MIT Press, Part IV, 1977.

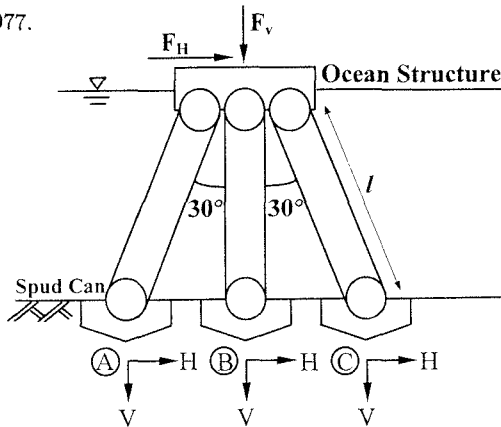


図1 対象とする3脚式の重力式海洋構造物

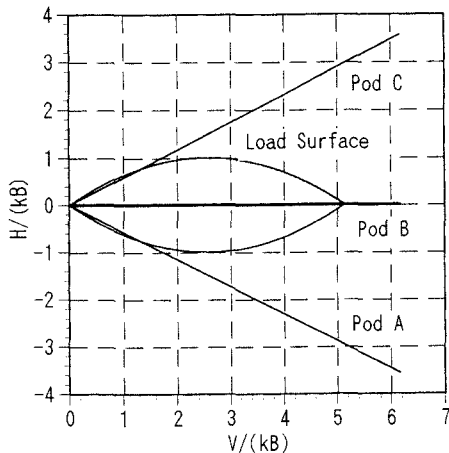


図2 各基礎の支持力曲面と載荷経路

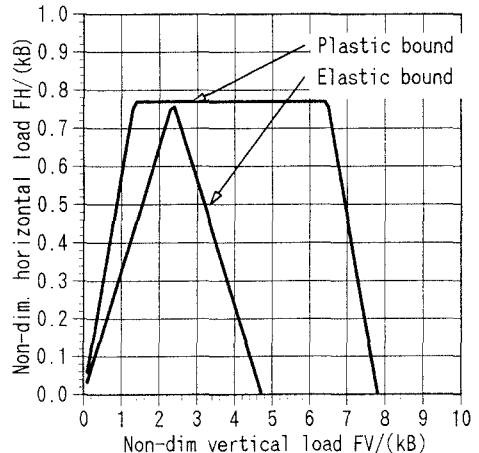


図3 本解析によって得た系の支持力特性