

構造物の不同沈下修正・制御に関する研究

研究代表者 研究員 川原 睦人（中央大学理工学部土木工学科）
 共同研究者 研究員 檜山 和男（中央大学理工学部土木工学科）
 共同研究者 客員研究員 加藤証一郎（大木建設（株）技術研究所）

1 はじめに

近年、軟弱地盤上に建設される建物の不同沈下を修正する目的でジャッキアップシステムを導入したという事例が数多く報告されている。ジャッキとしては、関西国際空港ターミナルビルの例のように、油圧ジャッキが適用されることが多い。これに対して、本研究では、油圧ジャッキの代わりとして円筒ゴム式ジャッキ（以下、筒ジャッキと称す）の適用を検討している。円筒状のゴム製の筒ジャッキは、予め地中に埋設され、水や油などの液体の圧入により膨張して地盤ごと構造物を持ち上げることができる。図1のように、複数の筒ジャッキの適用により不同沈下の修正が可能となる。沈下量に比例して筒ジャッキが大きく膨張することで不同沈下が修正される仕組みである。沈下修正後に再び不同沈下が生じたとしても再度沈下修正することが可能である。本研究では、このような現象を表す数理モデルを設定して有限要素法により定式化し、最適制御理論に基づいて不同沈下の修正制御解析を行っている。この他に筒ジャッキによるジャッキアップの実験なども行っているが、本報では修正制御解析における研究成果を報告する。

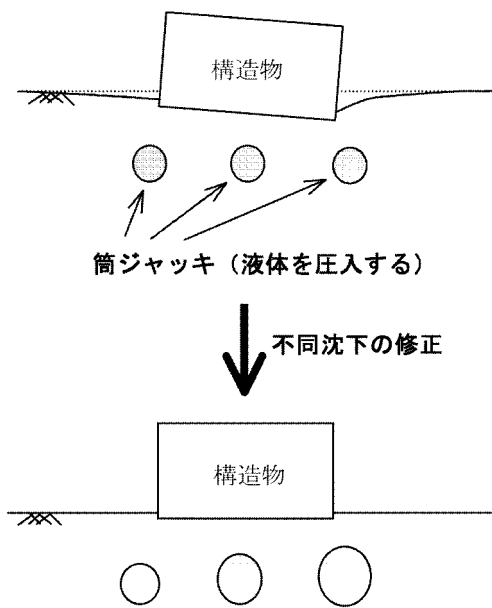


図1 筒ジャッキによる不同沈下の修正

2 解析方法

本研究では、構造物の不同沈下の修正制御という現象を2次元問題として定式化している [1],[2],[3],[5]。辺長比の大きい直接基礎形式の建物に適用する場合、筒ジャッキは建物の短辺方向に複数配置し、長辺方向の不同沈下を修正制御するのである。筒ジャッキは、短辺方向には一様に膨らむものとし、引張力だけを負担する1次元のトラス材（線形弾性）でモデル化する。これに関する基礎方程式は、次のように表される。

$$E_f A \frac{d^2 u_x}{dx^2} = -r \quad (1)$$

ここに、 u_x 、 $E_f A$ および r は、それぞれ x 方向の変位成分、軸剛性および軸方向の分布荷重を表す。

また、本研究において、2次元の地盤変形に関する基礎方程式は次のように表される。

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad \text{in } \Omega_g \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = -\frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \text{in } \Omega_g \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{in } \Omega_g \quad (4)$$

$$D_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})$$

$$\lambda = \frac{\nu E_g}{(1-2\nu)(1+\nu)}$$

$$\mu = \frac{E_g}{2(1+\nu)}$$

ここに、 $u_i (i=1,2)$ は x, z 方向の変位成分 u_x, u_z を表し、 E_g, ν および σ_{ij} はそれぞれ地盤のヤング係数、ポアソン比およびクロネッカーのデルタを表す。ヤング係数 E_g は、降伏規準に Mohr-Coulomb 式、塑性ポテンシャルに Drucker-Prager 式を適用する弾完全塑性モデル（関連流れ則に基づく）の場合と消費エネルギーが等しくなるように設定する。式 (2) ~ 式 (4) はそれぞれ応力の釣り合い、ひずみ - 変位関係および応力 - ひずみ関係（構成則）を表し、これらに対する境界条件は次のように規定される。

$$u_i = \hat{u}_i \quad \text{on } S_1 \quad (5)$$

$$t_i = \sigma_{ij} n_j = \hat{t} \quad \text{on } S_2 \quad (6)$$

ここに、 t_i, n_j はそれぞれ表面力、境界上の外向き単位法線ベクトルを表す。1次元のトラス材にモデル化される筒

ジャッキは、2次元の地盤に重ね合わせられ、地盤と一体として有限要素法により定式化されている。

一方、筒ジャッキ内の液体に関する基礎方程式としては、2次元の非圧縮 Navier-Stokes 方程式が適用され、次のように表される。

$$\rho v_i + \rho(v_j - w_j)v_{i,j} + p_{,i} - k(v_{i,j} + v_{j,i})_{,j} = f_i \quad \text{in } \Omega_w \quad (7)$$

$$v_{i,i} + q = 0 \quad \text{in } \Omega_w \quad (8)$$

ここに、 v_i ($i = 1, 2$) および p はそれぞれ x, z 方向の流速成分および圧力を表す。 w_j, f_i はそれぞれ節点（離散点）の移動速度、物体力を表す。本研究では主に水が考慮され、 ρ, k はそれぞれ水の密度、粘性係数を表す。式 (8) の q は水の流入量を表し、修正制御に必要な制御流入量は最適制御理論に従って求められる。式 (7) と式 (8) に対する境界条件と初期条件は、次のように規定される。

$$v_i = \hat{v}_i \quad \text{on } S_1 \quad (9)$$

$$t_i = \{-p\delta_{ij} + k(v_{i,j} + v_{j,i})\}n_j = \hat{t}_i \quad \text{on } S_1 \quad (10)$$

$$(v_i, p) = (v_i^0, p^0) \quad \text{at } t = 0 \quad (11)$$

境界条件として式 (9) により流速、また式 (10) により表面力が規定される。 δ_{ij} と n_j はそれぞれクロネッカーのデルタと境界上の外向き単位法線ベクトルを表す。式 (7) ~ 式 (11) は、固定座標系と移動座標系の中間的立場をとることのできる ALE 法を取り入れた ALE 有限要素法により定式化されている。流速と圧力に対して三角形一次の内挿関数が仮定されている。また、流速と圧力の分離型解法として FS 法が用いられ、時間方向の離散化には陽的オイラー法が適用されている。式 (7) の左辺第 2 項は、線形レギュレータ問題に帰着した最適制御を行うため、時間方向の離散化において線形化されている。

更に、筒ジャッキが一体化される地盤と筒ジャッキ内の水との間の境界において表面力と変位の連続条件を課す。この連続条件のもとに連成解析が行われるが、必要計算容量の増大を回避するために本研究ではパーティション法 [4] と呼ばれる方法に従って地盤変形と水流を別々に解いている。

以上のように定式化される不同沈下修正の（離散）数理モデルに最適制御理論を適用し、不同沈下の修正制御解析を行っている。制御方法としてはフィードバック制御が適用されることが多いが、本研究では各地点の沈下の修正制御が同時に行われるように最適制御を適用している。最適

制御では評価関数を設定するが、本研究では評価関数 J を次のように定義する。

$$J = \left[\frac{1}{2}(u_z - u_z^*)^T R(u_z - u_z^*) \right] \Big|_{t=t_0}^{t=t_f} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} q_\alpha^T S q_\alpha dt \quad (12)$$

ここに、 u_z, u_z^* および q_α はそれぞれ鉛直変位ベクトル、目的点における目標鉛直変位ベクトルおよび制御時間内で一定の制御流入量（添字の α は筒ジャッキの個数を表す）、また t_0 および t_f は制御開始時刻および終端時刻を表す。 R および S は非負の対角要素を持つ重み係数行列を表す。式 (1) ~ 式 (11) および表面力と変位の連続条件を拘束条件としてラグランジュ乗数法に従って式 (12) に付帯させ、これを最小にする。比較的単純な計算アルゴリズムであるにもかかわらず収束性の良い Sakawa-Shindo 法を適用し、最小化を行っている。最小化（最適化）に成功すれば、終端時刻において目的点を目標位置に來させる（不同沈下が修正制御される）ことができ、また必要最小限の制御流入量を求めることができる。今回、不同沈下の修正制御解析は、表 1 に示す解析条件のもとに行った。

3 解析結果

修正制御解析では、図 2(a) のような有限要素分割を適用した。2次元地盤の解析領域は 14m×6m、地表面の基礎の長さは 8m、各々の筒ジャッキの半径は 1m とした。境界条件は、地盤の両側面と底面は固定とし、地表面は自由とした。制御時間は 10 分とし、目的点は基礎の両端と中央の 3 点とした。また、不同沈下の状態を作り出すために人為的に与える分布荷重とは別に、修正制御の過程において基礎の各節点には拘束圧 50kN/m² に相当する節点荷重

表 1 解析条件

ゴムの変形解析	
軸剛性 (MN)	0.2
地盤の変形解析	
ヤング係数 (MPa)	25.0
ポアソン比	0.3
密度 (Mg/m ³)	1.59
内部摩擦角 (rad)	0.70
粘着力 (kN/m ²)	7.0
水流れの解析	
微小時間増分量 (s)	0.05
密度 (Mg/m ³)	1.0
粘性係数 (Pa・s)	1.0×10 ⁻³
修正制御解析	
重み係数 R	1000.0
重み係数 S	1.0

を常に与えた。これは3階建ての建物(重量)の载荷に相当する。

2ケースの不同沈下を想定し、それぞれに対する修正制御解析を行った。最初のケースとして、図2(a)~図2(e)に示されるように、斜めに沈下する基礎および地盤を地中に埋設される3つの筒ジャッキによって元の位置に修正制御する解析を行った。まず、非常に剛な基礎の上に斜め分布荷重を人為的に与えて斜め沈下の状態を作り出した。そして、それぞれの筒ジャッキの膨張作用により修正制御するための解析を行った。その後、再度斜め分布荷重を与えて再び斜め沈下(1度目よりは沈下は少ない)の状態を作り出し、再び修正制御するための解析を行った。これらの図から2度の修正制御は概ね正しく完了したといえる。また、沈下量に比例して筒ジャッキが大きく膨張することによって修正制御されていることがわかる。図3(a)に示されるように、右側、中央、左側の筒ジャッキの順に大きな値の制御流入量が求めた。図3(b)に示されるように、評価関数は正しく収束している。ただし、図3(a)および図3(b)は1度目の修正制御の際の結果を表している。

一方、2ケース目として図4(a)~図4(e)に示されるように、相対的に沈下する基礎および地盤を元の位置に修正制御する解析を行った。解析条件や有限要素分割等は最初のケースと同様であるが、剛な基礎を仮定せず、相対的に真ん中が大きく沈下するように偏分布荷重を与えた。最初のケースと同様に相対的な沈下は2度作り出し、それぞれに対して修正制御を行った。これらの図から修正制御が概ね正しく完了したといえる。また、沈下量に比例して筒

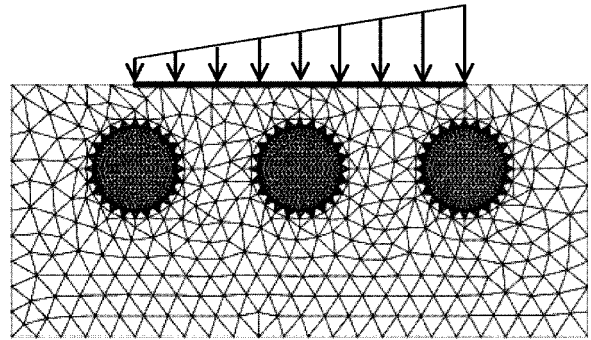


図2(a) 斜め分布荷重の仮定

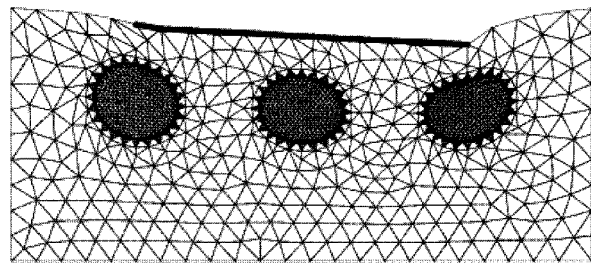


図2(b) 斜め沈下

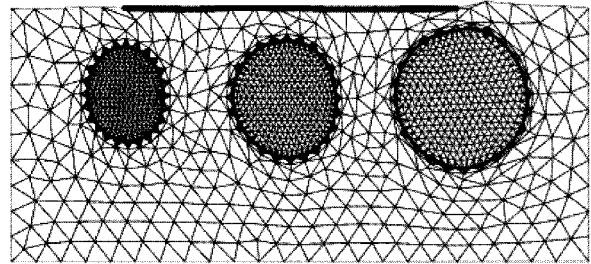


図2(c) 修正制御後

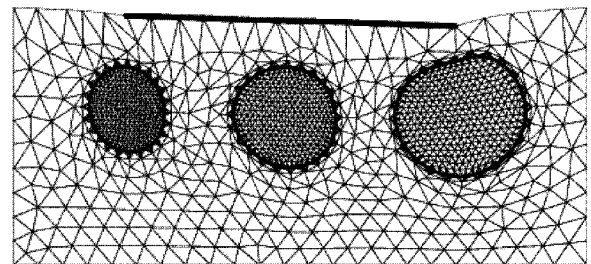


図2(d) 斜め沈下(2度目)

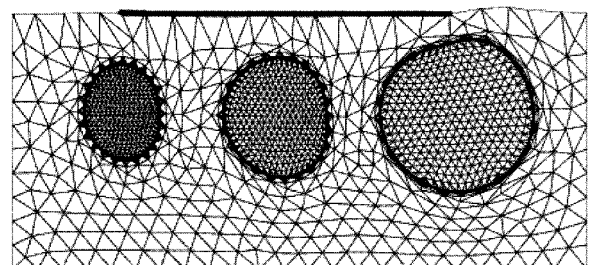


図2(e) 修正制御後(2度目)

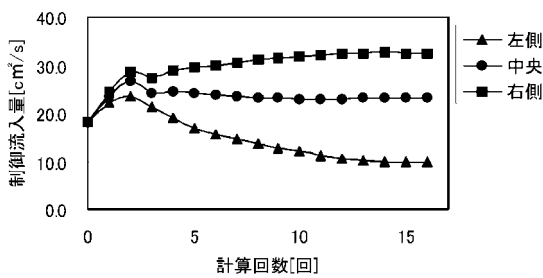


図3(a) 制御流入量

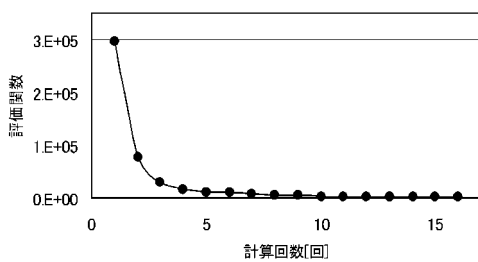


図3(b) 評価関数

ジャッキが大きく膨張しているのがわかる。なお、評価関数の収束は確認され、筒ジャッキごとに膨張の大きさに比例した制御流入量が求まっている。

4 おわりに

構造物の不同沈下修正という現象を表す数値モデルを設定して有限要素法により定式化し、これに最適制御を適用した制御解析が行われている。今回は、2 ケースの不同沈下を想定し、3 つの筒ジャッキによる修正制御の解析を行った。どちらの場合も沈下修正は概ね正しく完了した。沈下修正後に再度発生する不同沈下に対しても沈下修正が可能であることを確認した。これらのことから、構造物の不同沈下修正・制御における筒ジャッキの有効性を確認した。今後は、単一または複数の筒ジャッキによるジャッキアップの実験を経て実用化を目指す予定である。

参 考 文 献

- [1] 加藤証一郎, 川原睦人: 水 土 パルーン連成問題における変位制御解析, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, I-B230, 2001.
- [2] S. Kato, S. Suda, K. Imazu, H. Nakane and M. Kawahara: A Control Analysis of Interaction Problem by Fluid Force, Communications in Numerical Methods in Engineering, Vol.17, Issue 7, pp.465-476, 2001.
- [3] S. Kato and M. Kawahara: A Control Analysis of Displacement in Fluid-Soil-Balloon Interaction Problem, Proc. of the First Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics, Vol.2, pp.1357-1362, 2001.
- [4] Serge Piperno, Charbel Farhat: Partitioned Procedures for the Transient Solution of Coupled Aeroelastic Problems Part II: energy transfer analysis and three-dimensional applications, Comput. Method Appl. Mech. Engrg. 190, pp.3147-3170, 2001.
- [5] S. Kato, S. Suda, K. Imazu, H. Nakane and M. Kawahara: A Displacement Control Analysis for a Building Under the Differential Settlement Condition by Using Multi-Balloons on Friction Piles, Int. Conf. on Finite Elements in Flow Problems, 2000.

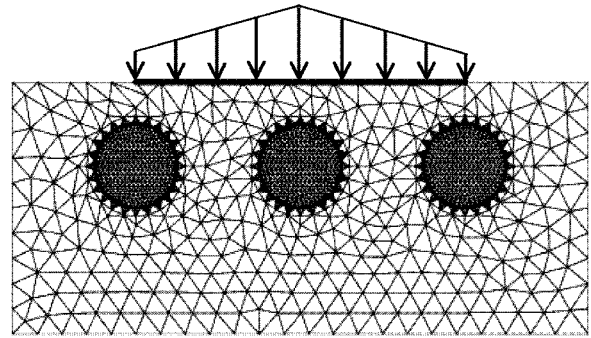


図 4(a) 偏分布荷重の仮定

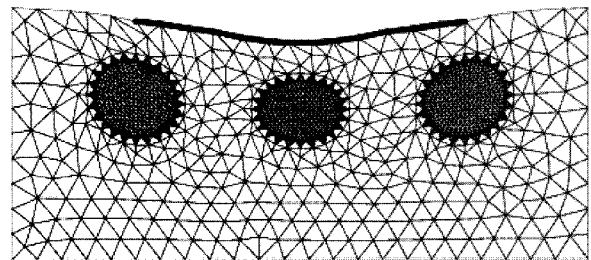


図 4(b) 相対的な沈下

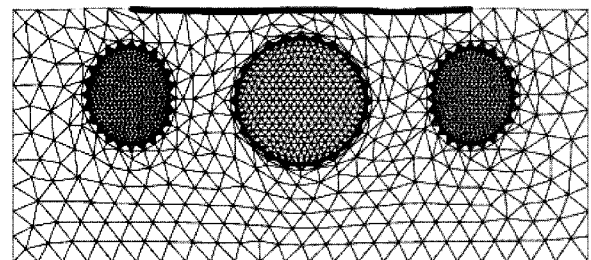


図 4(c) 修正制御後

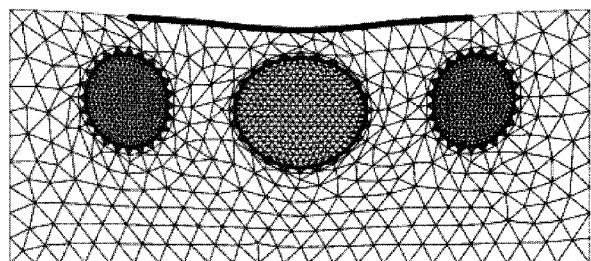


図 4(d) 相対的な沈下 (2 度目)

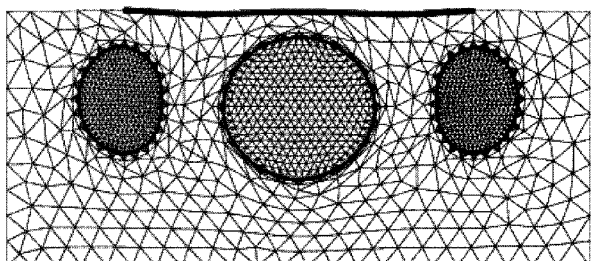


図 4(e) 修正制御後 (2 度目)