モーションキャプチャによる潜函の微小変位計測および沈下量予測の可能性

鹿島建設(株) 正会員 ○坂梨利男 加藤勝則 杜若善彦 仲野勝博 林 雅人

1. はじめに

ニューマチックケーソン(以下 潜函)工法に内在する危険のひとつに過沈下があ る.過沈下は掘削作業中の沈下量が想定を上回る現象であり,作業室内の作業者に 危険が及ぶことから,対策が必要である.対策の前提として,まず沈下の挙動を定量 的に予測しなければならないが,確立された予測方法はない.今回,光学式モーショ ンキャプチャ(以下 MC)を適用して,潜函の沈下の挙動を詳細に測定した.MCを使 うことで,沈下の挙動を運動方程式に記述できるようになったので報告する.

2. 光学式 MC の計測原理

今回計測に使用した光学式 MC の測定原理は、高精度カメラ(写真-1)を使った三 角測量である. すなわち、マーカー(写真-2)と呼ばれる計測点を計測対象物に取付け、 それを複数の高精度カメラで撮影すると、カメラごとに画像平面に映るマーカーの位置 が異なる. その視差を基にマーカーの座標を逐次計算すれば、マーカーの変位が分かる. 使用した機器¹⁾は 0.001 mm の分解能を持ち、100kHz の計測が可能であるが、今回は潜 函の特性から 30Hz の計測間隔とした.



写真-1 高精度カメラ



3. 計測結果

 $\phi = 0^{\circ}$, c=27kN/m², $\gamma = 15$ kN/m³ の軟弱粘土層に直径 20m の円形潜函を沈設した.刃先の深度が GL-8.945m に達し た時点から4日間, MC による沈下の計測を行った.従来の巻取り式沈下計は分解能が±1.5mm であり巨視的な挙動 しか把握できないが, MC を使えば数 mm の沈下を構成する複数の挙動を読み取れた.図-1 にタイムレンジを変えた 沈下の様子を示す.沈下の過程には(a)減速しながら沈下する期間,(b)ほぼ等速度で沈下する期間および(c)揚圧 力の効果でわずかに上昇する期間があることが分かる.



4. 沈下量予測のための運動方程式への適用可能性

阿部 2)らは運動方程式を使って、潜函の沈下量を予測している.運動方程式は式(1)のようになる.

$$M\frac{d^2z}{dt^2} = Mg - q_u \cdot A_B - p \cdot A_S - c \cdot A_P \tag{1}$$

ここに,

z:潜函の刃口標高,g:重力加速度,M:潜函の質量,q_u:刃口反力度,A_B:刃口反力の作用面積,
 p:作業気圧,A_s:作業室の平面積,c:周面摩擦力度,A_p:地盤に接している周面積.

キーワード ニューマチックケーソン,モーションキャプチャ,過沈下,運動方程式,非線形最小二乗法 連絡先 〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11 鹿島建設(株)土木管理本部土木技術部 TEL03-5544-0629 阿部らは、粘性土地盤において作業気圧を意図的に低下させ、1回に数十 cm 沈下させる場合の沈下検討を行った. 同様の手法を砂質地盤や軟弱粘性土地盤に適用することには成功していないが、その原因は、当時の計測技術では 微小な沈下を検知できなかったことにある。今回 MC を使うことで、運動方程式に含まれる 2 階微分を出力値の差 分として高精度に近似可能になった。 $A_p \ge A_B$ は幾何学的に算出できる。pは 0.1kPa の精度で計測可能である。 q_u および c については精度の良い計測方法が無いが、運動方程式(1)を変形した回帰式(2)の未知数として最尤推定 ³⁾ できる。式(2)のうち、赤文字は推定するパラメータ、黒文字は定数あるいは観測値である。

s.t.

$$\frac{A_{B_i}}{M} \cdot q_u \cdot + \frac{A_{P_i}}{M} \cdot c + \frac{p_i \cdot A_S}{M} + \left(\frac{d^2 z}{dt^2}\right)_i - g = Er_i$$
(2)

ただし、Eriは誤差項、iは計測番号、Nは計測総数であり、各項は非負である.

5. ケーススタディ

今回,作業気圧については 1 分間隔の記録しか残って いなかったため,式(2)から 1 日の沈下の挙動全体を再現 することはできなかった.そこで,作業気圧に変化が無か った小区間について, q_u およびcを推定した.一例を以下 に示す. 図-2 の期間の計測値について回帰曲線 (2 次) を求め,回帰曲線の 2 次導関数と式(2)の 2 階微分項の差 を最小とする q_u およびcを推定した.図-2の例では, q_u = 34kN/m², cは恒等的に 0 になった(R = 0.99).この例の他 にも同様の期間が 84 回観測されている.そこからランダ ムサンプリングして同様の推定を行い, q_u = 34.7kN/m²(σ = ±0.2kN/m²), c = 0kN/m²を得た.



6. 考察

従来,施工時の潜函の刃口に作用する地盤反力度は,便宜的に Terzaghi 式で求めている. その場合,今回の地 盤であれば,極限地盤支持力度は約 140kN/m²になる. 一方,今回得られたq_uは,どれも 30kN/m²程度であった. 今回は刃口周辺に堀残しがあり人為的に刃口下を掘れなかったが,刃口下の地盤は破壊し,潜函は沈んでいる. こ の乖離は,地盤反力のモデル化が原因と考えられる. Terzaghi 式の流用については,妥当性の検証が必要である.

各種示方書は地盤条件に応じた静止周面摩擦力度を例示しているが,沈下量予測には適用できない.今回,動摩 擦力度の推定方法を示せたことには意義があると考える.

7. 結論

光学式 MC を使って潜函の沈下挙動を計測した.実計測から得た結果を運動方程式に代入することによって,地 盤反力度,周面摩擦力度を逆算できた.今後は,刃口下地盤の支持力機構を明らかにするとともに,軟弱地盤を沈 設する潜函について,姿勢制御策や過沈下防止策の要否判定方法を検討する予定である.

参考文献

- 1) オプティトラック・ジャパン株式会社ホームページ: https://www.optitrack.co.jp/
- 2) 阿部 裕, 鬼木剛一, 雁原康夫, 山本毅史: ニューマチックケーソン工法の沈下管理について, 鹿島建設技術研 究所年報, 第 31 号, pp145-150, 1983.
- 3) 山下信雄:非線形計画法, pp131-134, 朝倉書店, 2015.
- 4) 鉄道総合研究所:鉄道構造物等設計標準·同解説 基礎構造物, p198, 2013.
- 5) 日本道路協会:道路橋示方書·同解説 IV 下部構造編, p. 327, 2013.