

ニューマチックケーソン施工過程の数値解析

Numerical Modeling of Pneumatic Caisson Method

梅田 法義*・藤井 直**・井上 智裕***・大内 正敏****・下間 充†・田村 武‡
 Noriyoshi UMEDA, Nao FUJII, Tomohiro INOUE, Masatoshi OHUCHI, Mitsuru SHIMOMA
 and Takeshi TAMURA

*正会員 工学士 (株) 白石 技術本部長 (〒 101-8588 東京都千代田区神田岩本町 1-14)

**正会員 工学士 (株) 白石 技術本部技術開発部 (〒 101-8588 東京都千代田区神田岩本町 1-14)

***正会員 工学士 (株) 白石 技術本部技術開発部 (〒 101-8588 東京都千代田区神田岩本町 1-14)

****正会員 工学士 (株) 白石 技術本部技術開発部長 (〒 101-8588 東京都千代田区神田岩本町 1-14)

†正会員 工学士 清水建設 (株) 土木東京支店工事長 (〒 101-8588 東京都港区芝浦 1-2-3-12 シーバンス S 館)

‡フェロー会員 工博 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

The pneumatic caisson is frequently used as one of the safe and effective ground excavation methods and there are a number of experiences of both small and large scales of caissons in Japan. The air pressure applied at the working chamber which prevents the ground water from inflowing plays an important role in this method. In the present paper, a simple mechanical model is proposed to predict the deformation of the surrounding ground considering the interaction among the caisson weight, the side friction force and the cutting edge reaction force. Through several numerical examples by the finite element method, it is proved that the stability of the surrounding ground around the caisson and the surface settlement are heavily related with the air pressure in the working chamber.

Key Words : pneumatic caisson, excavation, air pressure, stability, seepage

1. はじめに

ニューマチックケーソン工法は、ケーソン躯体の構築と、その下部の地盤の掘削による沈下を繰り返しながら、基礎などの地下構造物を建設するものである。特に地盤掘削底面に地下水圧と同等の空気圧を作用させて地下水の浸入を許さずに施工する安全かつ確実な方法であり、わが国でも多くの実績を有している。しかし近年では、都市化が進み新しく地下構造物を構築する場合、既設構造物に近接した状況での施工を余儀なくされることが多い。そのため、ケーソン構築および沈下における周辺地盤の変形や応力状態を予め把握することは、施工安全性を確保するために重要である。掘削を模擬するための数値解析は地盤工学でしばしば扱われる基本的な課題であるが、ニューマチックケーソンによる施工過程では、ケーソン構造と地盤との相互作用の影響を正しく評価することが必要となり、たとえば地盤の物性に線形性を仮定しても最終状態を1段階で計算することはできない。これまでそれを考慮した詳細な数値計算は行われていなかった。そのためには、地盤掘削、地下水圧あるいはケーソン荷重と周面摩擦など種々の力学量を考慮したモデルを作り、それに基づく数値解析手法を確立しなければならない。本研究では、まず、力学的基礎に立脚し整合性のとれたニューマチックケーソン工法の施工過程を模擬するための計算手法を提案する。そしてそれをを用いた有限要

素法による応力変形解析を通して、掘削底面の空気圧の効果あるいは周面摩擦力の影響について検討しながら、ニューマチックケーソン工法の特徴について考察する。

2. ニューマチックケーソン工法の概要

2.1 工法の原理

ケーソン (caisson) という語は、フランス語のケース (caisse) に由来し、箱あるいは外枠を意味する。地上で構築した箱または筒状の構造物を、内側の地盤を掘削しながら所定の支持層に達するまで沈下させて地下構造物とする工法を一般にケーソン工法^{1),2)}という。ケーソン工法はその施工法により、オープンケーソン工法とニューマチックケーソン工法に大別される。両者の相違点は、オープンケーソン工法では底部地盤を主として水中掘削するが、一方、ニューマチックケーソン工法では、底部に設けた作業室内へ掘削面の地下水圧に相当する圧力の圧縮空気を送気して、「ドライな状態」の掘削作業空間を確保する点である。ニューマチックケーソン工法の施工手順の概略を図-1に示す。手順1では、整地された地盤上にケーソン下端の刃口部分と作業室スラブを含む初期リフトの構築を行う。手順2では、作業室内に圧縮空気を送り込みながら、ケーソン底部地盤を掘削排土することによりケーソンを沈下させる。手順3では、ケーソンの上部リフトを構築

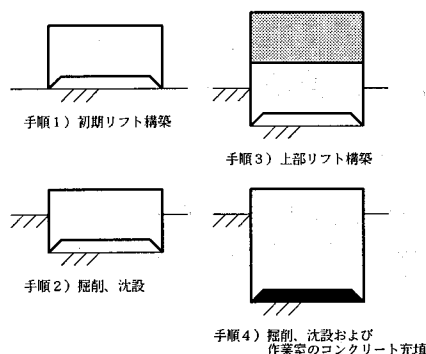


図-1 ニューマチックケーソンの施工過程

する。この後、手順2と手順3を繰り返して、所定の深度まで沈下を終えた後、手順4で作業室に中埋めコンクリートを充填して施工完了となる。

2.2 工法の歴史

1910年には中国と朝鮮の国境における鴨緑江鉄道橋の基礎工事がニューマチックケーソン工法で施工され、日本人が技術者として本工法に初めて関わった。そして、関東大震災直後の1923年に東京で、震災により焼失した隅田川諸橋復興のため、永代橋・清洲橋・言問橋の基礎工事に於いて本工法が日本国内で初めて施工された。その後、多くのケーソンが施工され、本工法は徐々に改良され続けた。図-2は1990年～2003年におけるニューマチックケーソン工法の施工実績を、水平断面積と掘削深度の関係³⁾で表したものである。立坑での採用は、シールドトンネルの大深度化の傾向を受け40m以深の事例が多い。橋梁基礎では、水平断面積で100～1500m²程度が多いが、3000m²を超える事例もある。また、駐車場やトンネルなどの地下構造物では水平断面積で1500m²程度までの事例が多いが、3000m²近い事例もある。掘削作業の機械化・省力化、無人化へとケーソン技術が進歩したことで、工事規模・用途など工法の適用領域が拡大し、都市部で近接施工が問題となる建設工事において特に有力な施工法となってきた。しかし、ケーソン施工過程における周辺地盤への影響評価については、地盤挙動の精度良い予測技術が進展していないため、安全性と経済性に優れた都市土木技術の研究開発の一環として、影響評価手法の確立が要求されている。

3. ニューマチックケーソン施工のモデル化

ニューマチックケーソン工法では、地下水が掘削底面から流入しないように地下水圧に匹敵する空気圧をそこに作用させる。したがって地盤は、ケーソン底面との接触面においてケーソンからの力とともにこの空気圧を受ける。一方、ケーソンの自重は地盤からの接触力のほかに、掘削底面における空気圧で支えられる。

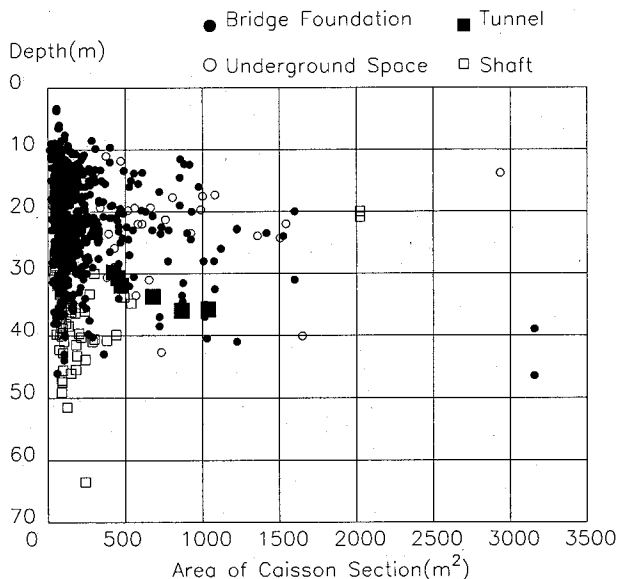


図-2 ニューマチックケーソンの施工過程

これらの力のやりとりがケーソンの構築、地盤の掘削そしてケーソンの沈下に伴って順次、繰り返される。この過程を数値計算で模擬するためには、個々の段階での力学的な相互作用を明確にしておく必要がある。ここでは、ケーソンの自重に対するつりあいを考慮しながら、掘削地盤に作用する荷重を検討する。

3.1 ケーソンの施工順序と自重のつりあい

図-3はニューマチックケーソン工法の力学的過程を表す。(a)のstep(0-0)は、地盤の自重のみが作用している初期応力状態である。この状態を基準として地盤変位を定義する。(b)のstep(0-1)は地表面においてケーソンの刃口部を含む初期の(第1リフトの)構築を示す。このときケーソンの自重 W_1 は、刃口先端における刃口反力の総和 R_1 によって支えられる。図中の r_1 は、刃口の単位長さ当たりの力であり、刃口に沿うその総和(線積分)が R_1 である。ここでは

$$R_1 = \sum r_1 \quad (1)$$

と表す。以下、 R_i と示す量は同様な意味をもつ。この時点のケーソンの自重に関するつりあい式は

$$W_1 = R_1 (= \sum r_1) \quad (2)$$

である。ケーソンはまだ地上にあるので、この段階における掘削深度は0である。

(c)のstep(1-0)は、地表面から掘削を行ない、主としてケーソンの自重を利用しながら h_1 の深さまで沈下させた状態を示す。ここにおいて f_1 はケーソン側面に作用する単位面積当たりの周面摩擦であり、それらの総和(面積分)を F_1 と書き

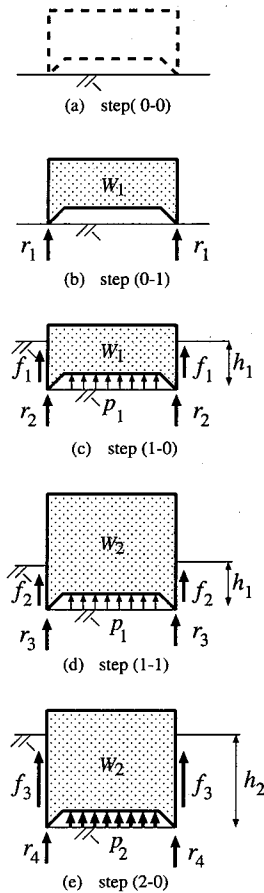


図-3 ケーソンの施工過程とケーソンに作用する力

$$F_1 = \sum f_1 \quad (3)$$

と表す。以下、 F_i と示す量は同様な意味をもつ。また、 p_1 は掘削底面で地下水圧に対抗して作用させる空気圧であり、掘削深さを h_1 、地下水の単位体積重量を γ_w とするとき $p_1 = \gamma_w h_1$ である。なお、簡単のため地下水面は地表と一致すると仮定する。ケーソンの（水平）断面積を A とするとき、その総和 P_1 は

$$P_1 = \gamma_w A h_1 \quad (4)$$

と表される。以下、 P_i と示す量は同様な意味をもつ。この段階におけるケーソンの自重に関するつりあい式は

$$W_1 = P_1 + F_1 + R_2 (= \gamma_w A h_1 + \sum f_1 + \sum r_2) \quad (5)$$

である。

一般に、ケーソン内部はコンクリートで充填されていることは少なく、コンクリートの壁によりいくつかの空間に仕切られている。ケーソンの沈下を促進するために内部に水を注入したり、あるいは適当な反力をとりながらジャッキを用いて鉛直下向きの力を作用させることがある。つまりケーソンを沈下させる段階において刃口反力 r_i が負になることがないようにケーソ

ン全体の鉛直荷重を大きくして沈下を促進することになる。ここでは、それらをすべて含めてケーソンの自重としておく。また、空間部を含めてこれらを考慮したケーソンの平均的な単位体積重量を γ_c と表す。

次に (d) の step(1-1) において、地上部でケーソンを上部に継ぎ足すような（第2リフトの）構築を行なう。ここでケーソンの自重は W_2 となる。このとき、ケーソン自重の W_2 は、step(1-0) と同じ値の空気圧の総和 P_1 と、新たな周面摩擦 f_2 の総和 F_2 および刃口反力 r_3 の総和 R_3 で支持される。このステップにおけるケーソンの自重に関するつりあい式は

$$W_2 = P_1 + F_2 + R_3 (= \gamma_w A h_1 + \sum f_2 + \sum r_3) \quad (6)$$

である。

(e) の step(2-0) では、再び地盤の底面を掘削しケーソンを h_2 まで沈下させる。ここで自重 W_2 は、周面摩擦 f_3 の総和 F_3 、刃口反力 r_4 の総和 R_4 および掘削深度 h_2 の地下水圧に相当する空気圧 $\gamma_w h_2$ の総和 P_2 で支持される。したがって、この段階におけるケーソンの自重に関するつりあい式は

$$W_2 = P_2 + F_3 + R_4 (= \gamma_w A h_2 + \sum f_3 + \sum r_4) \quad (7)$$

である。

以下、同様にケーソン構築とケーソン沈下を繰返し、所定の深さまで進行する。一般に step($i-j$) の前の添字 i は掘削深さの段階を表し、後の添字 j が 0 の場合は当該リフトの沈下完了直後の状態を、また、これが 1 の場合はケーソンの次リフトの構築直後の状態をそれぞれ表す。

ここで示したケーソンの自重のつりあい式は、主として刃口反力の R_i を求めるために用いられる。それには周面摩擦 f_i の算定が必要となるが、摩擦係数と水平応力から計算されることは少なく、実務的にはケーソンの沈下深さに沿って比例して増加するような経験値が用いられる。したがってこのような場合には、図-3 で $f_1 = f_2$ となる。

3.2 地盤に作用する荷重

前節ではニューマチックケーソン施工過程のそれぞれの段階において、その自重がどのような力で支持されるかを見たが、それを踏まえて図-4 では個々の段階でどのような力が地盤に作用するかを表している。(b) の step(0-1) では、ケーソン自重は刃口反力 r_1 のみで支えられているので、地盤に作用するのはこの刃口反力のみである。

(c) の step(1-0) では地盤に対して、ケーソンを支持する力の反力として空気圧 $p_1 (= \gamma_w h_1)$ 、周面摩擦 f_1 および刃口反力 r_2 が作用する。そして、さらに地盤は h_1 だけ掘削されたので γh_1 だけ鉛直上向きの除荷が生じる。ここに、 γ は地盤の（湿潤）単位体積重量である。したがって、(c) に示すように掘削底面では $(\gamma - \gamma_w) h_1$

だけの上向きの応力が作用する。すなわち、ケーソン底面の掘削では、有効応力分だけの除荷が生じていることになる。(ただし、図中では掘削底面に一様な分布荷重として除荷が示されているが、実際には以前の段階で初期応力は変化しており一様とはならない。数値計算における手法の詳細については付録に示す。説明を簡単にするために、当面、一様分布としておく。)

なお、掘削底面で地盤に空気圧を作用させても、同時にそれはケーソンに上向きの力として働く。したがって、式(5)、(6)、(7)などからわかるように空気圧に相当する分だけの刃口反力 R_i (あるいは周面摩擦力 F_i) が減少するので、地盤全体に作用する合力の大きさは変わらない。つまり地盤に対し除荷されるのは掘削される地盤の全重量であり、一方、新たに载荷されるのはケーソンの自重となる。すなわち、空気圧の大きさは、地盤全体の载荷、除荷の力の総和とは無関係である。このことから掘削深さ h_1 による除荷の総和、つまり、地盤の自重 γAh_1 と、载荷されるケーソンの自重 $W_1 (= \gamma_c Ah_1)$ の大小比較により、地盤全体として除荷されたか、あるいは载荷されたかが決まる。

(d) の step(1-1) では、一般に周面摩擦と刃口反力の大きさは変化するが、掘削底面の除荷に相当する荷重は不変である。

(e) の step(2-0) は、step(1-0) と同様に考えることができる。

3.3 地盤に作用する増分荷重

ニューマチックケーソンの施工過程に従って周辺地盤の応力や変形を計算しようとする場合、上記のように各ステップごとにそれを追跡しなければならない。なぜならケーソンの深度に従ってケーソン自体が地盤の変形を拘束する。すなわち、ここではケーソン側面はなめらかで剛な境界としている。したがって、たとえ地盤が線形弾性体であっても最終ステップのみの計算では全施工過程を表しえない。そこで実際には、各段階ごとの増分計算を実施することになる。前節の結果を用いて各施工段階ごとの荷重の差をとれば、必要な増分荷重が得られる。それを図-5に示す。(b) の step(0-1) は、図-4(b) と同じである。(c) の step(1-0) では、ケーソン周辺において周面摩擦 f_1 および新たな刃口反力 r_2 が下向きに、また、掘削底面には有効応力に相当する上向きの荷重が作用する。そしてこれらとともに、step(0-1) で作用させた刃口反力 r_1 を除荷しなければならない。(d) の step(1-1) では、ケーソン構築に伴う周面摩擦の変化と刃口反力の増分を作用させればよい。(e) の step(2-0) では、(c) の step(1-0) と同様な方法を用いればよい。

なお、step(1-0) や step(2-0) では、(有効応力に相当する) 地盤掘削の除荷を伴うが、後述の有限要素法による数値計算では付録に示すような要素の削除と空気圧の载荷を行えばよい。

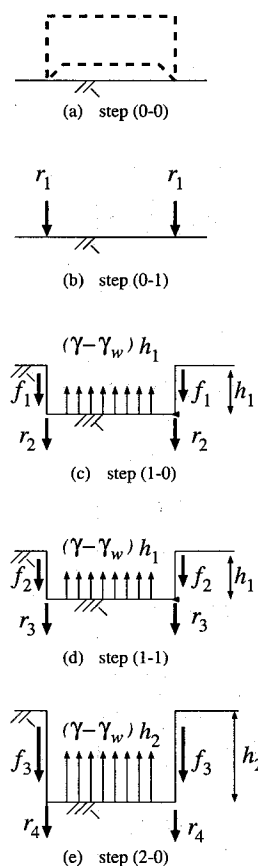


図-4 地盤に作用する荷重

3.4 全応力解析と有効応力解析

ニューマチックケーソン工法の大きな特徴は、掘削底面において地下水圧と等しい空気圧を作用させることである。またケーソン周辺は完全な非排水条件であって地下水の流動もないため、地下水圧は掘削前の静水圧状態を保っている。その結果、全応力の変化はそのまま有効応力の変化と一致する。したがって、地盤掘削という面でみれば、地盤内部の応力状態は、図-6に示す「水中掘削」と等価である。すなわち、ケーソン自重の効果を無視すれば、いわゆる「オープンケーソン」と同じ原理となる。実際、図-4のそれぞれの図で掘削底面に作用している掘削外力(鉛直力)の大きさは、それぞれの掘削深さに相当する水中重量にほかならない。そのため、周面摩擦や(空気圧を考慮して計算した)刃口反力に対して有効応力解析すれば地盤の変形や有効応力の変化が求められる。(実際に以下に示す数値計算では有効応力解析を行なった。)

4. 計算例と考察

ケーソンの平面形状には円形や長方形などの種々のものがあるが、ここでは簡単のため平面ひずみ条件を採用するため長方形の断面のものを想定した。平面ひ

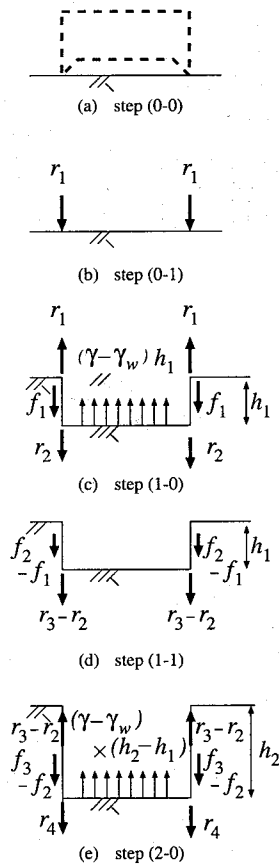


図-5 地盤に作用する増分荷重

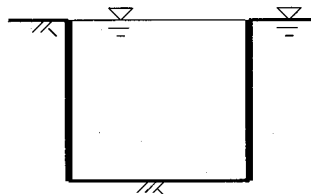


図-6 水中掘削

ずみ条件のもとで有限要素法による数値解析を行うために、図-7に示すような深さ H 、幅 $L(=H)$ なる解析領域を144個の同じ大きさの正方形要素に分割した。太線はstep(0-1)からstep(6-0)まで合計12段階で沈設するニューマチックケーソンによる掘削範囲を示し、その深さを $D(=H/2)$ として(半)幅を $B(=H/3)$ とした。左端は対称面である。変形に関する境界条件は図に示すとおりである。12段階のうち奇数段階はケーソンの構築過程であり、偶数段階はケーソンの沈下過程である。構築されたケーソンは剛体とする一方、地盤の構造骨格は等方線形弾性体とし、そのYoung率を E とし、Poisson比を $\nu(=1/3)$ とした。(このような仮定で地盤の変位を評価する場合、解析領域の設定⁴⁾に注意しなければならないが、ここではその影響を考慮

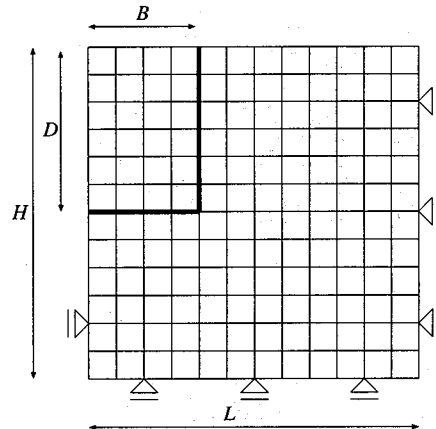


図-7 有限要素分割

していない。) また、静止土圧係数を $K_0(=0.5)$ とする。なお、水の単位体積重量 γ_w に対し、ケーソンの(平均的な)単位体積重量 γ_c は $1.6\gamma_w$ から $2.3\gamma_w$ の範囲にある⁵⁾といわれているが、ここでは地盤の(湿潤)単位体積重量 γ と等しいとした。すなわち、ケーソンを沈下させたときには、掘削した地盤の総重量とそこに設置したケーソンの重量とは同じと仮定した。このようにケーソン自体の自重が地盤掘削による除荷の影響を減じる効果があるが、これは後述するようにニューマチックケーソン工法の1つの大きな特徴である。

4.1 周辺地盤の変形と応力状態

まず、簡単のためケーソンの周面摩擦はない場合を考える。すなわち、ケーソンの自重を刃口反力と空気圧のみで支持する場合である。掘削に先立ち地表で1要素の高さ分だけのケーソンの構築を行ない、それを沈下させたあと、さらに地表で1要素の高さ分だけのケーソンを増設する。このような過程を繰り返し、6要素分の高さのケーソンを完全に設置し終えたとき(第12段階)の状態を図-8に表す。ここでは、変形(上左図)、主応力(上右図)および全要素のMohrの応力円(下図)を示す。有効主応力のうち一部の太い線は引っ張りに対応する。また、Mohrの応力円の図では、参考のために内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ の破壊線を併せて引いている。なお、応力はすべて有効(圧縮)応力である。また、変形量については「自重による沈下(の2倍)」に相当する $\gamma H^2/E$ で、また、主応力については「領域底面の鉛直応力」に相当する γH で無次元化した場合の単位の大きさをそれぞれの図の上部に矢印の線分として表している。

この最終状態では、掘削された地盤の重量と同じ重量のケーソンが沈設されているので領域全体の重量は掘削前と同じである。しかし、掘削底面ではその深さの地下水圧に匹敵する空気圧しか作用しないので、地盤は上昇している。同時に掘削された地盤の重量の一部

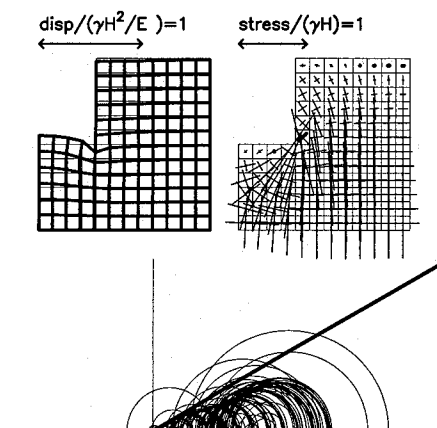


図-8 沈設完了状態（周面摩擦なし）

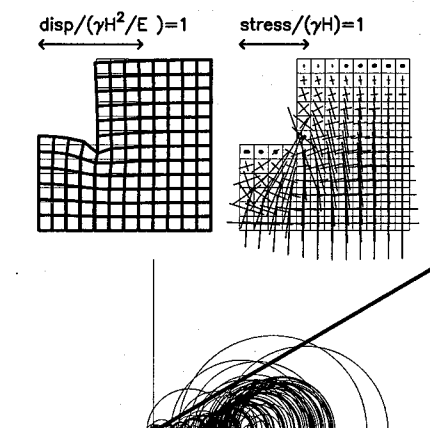


図-10 沈設完了状態（周面摩擦なし、2段階計算）

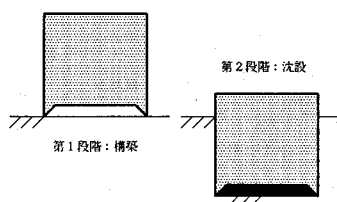


図-9 2段階計算

はケーソン自重として刃先に集中することになる。その結果、刃先部で応力集中が起こるとともにケーソン壁面に沿って地表面まで沈下が伝わることになる。刃先部周辺のいくつかの要素では $\phi = 30^\circ$ と設定した破壊線を超えている。

図-8 は、ケーソンの構築と沈下をそれぞれ6段階に分けて逐次計算を行なって得られたものであるが、もし、これを図-9 に示すようにケーソンの構築と沈下をそれぞれ1段階として合計2段階で一挙に計算すると図-10 のようになる。先に述べたようにケーソン自体は剛体と仮定していることから、ケーソンが地盤中にあるときはケーソン側面での側方変位が拘束されるため、逐次計算の段階数を多くする場合（図-8）と比べて、変位や応力に少し変化が見られる。実際、地表面沈下はわずかにではあるが大きくなっている。また、Mohr の応力円を見れば、引っ張り応力が軽減されている。このことから、たとえ地盤が線形弾性体であっても両方で結果が異なることに注意すべきである。特に地盤を弾塑性体など非線形材料として扱う場合には、より大きな差異がでることが予想されるので、なるべく実際の施工過程に沿った逐次計算をしなければならない。

4.2 空気圧による荷重効果と非排水効果

前述したようにケーソンによる掘削は、掘削底面に地下水圧相当の空気圧を作用させるので水理条件としては水中掘削と同様である。つまり、ケーソン周辺の地

下水圧は掘削前の静水圧まま保持されている。このように空気圧を作用させることの施工上の目的は、地下水を浸入させないで施工性を上げることであるが、以下に述べるようにその他にも重要な役割を果たしている。

そこで、ケーソンの施工が完了した時点（第12段階）で空気圧の作用を仮に停止したとすれば、どのような現象が生じるかを検討する。実際のニューマチックケーソンの施工でこのようなことは生じないが、空気圧の効果を考察するために数値的に模擬してみる。図-8 の第12段階のあとに続けて、地下水の流出を許すことなく（非排水条件で）、掘削底面に作用している空気圧を除去すると図-11 に示すような状態となる。このとき依然として地下水は静水圧のままである。この状態に移行するとケーソンの自重の一部を支えていた掘削底面での空気圧がなくなるため、それがすべて刃口反力として掘削底面の端部に作用する。すなわち、地盤に作用するケーソン自重の総量は変化しないが、作用の仕方が変化する。図-8 と比較すると掘削部で地盤が大きく上昇する一方、刃先部で沈下が大きくなっている。また、掘削底面での空気圧の作用を停止したため、そこでの作用荷重は0（鉛直全応力の作用していない状態）となるが、地表面からの深さに比例する地下水圧があるため、そこに大きな引っ張り有効応力が発生する。Mohr の応力円からもわかるように、地盤応力としてはもっとも不安定な状態である。連続地中壁などによる開削工法において補助的な工夫をなにも施さない場合、図-11 に類似した状態が出現する。（通常の開削工法ではケーソン自重に相当するほどの大きな鉛直荷重がないため、さらに引っ張り応力が卓越した不安定な状態となる。）これからニューマチックケーソン工法における掘削底面の空気圧が、単に地下水の浸出を防いでいるばかりでなく、「荷重効果」として地盤の安定性に大きく貢献していることがわかる。

次に図-11 の状態から、さらに掘削底面での排水を許して定常浸透が生じている状況を考える。これも想

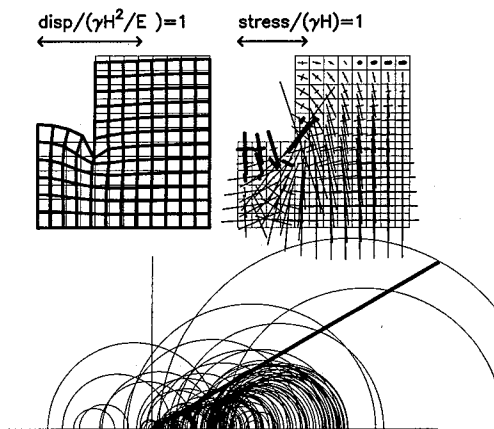


図-11 空気圧作用の停止（周面摩擦なし）

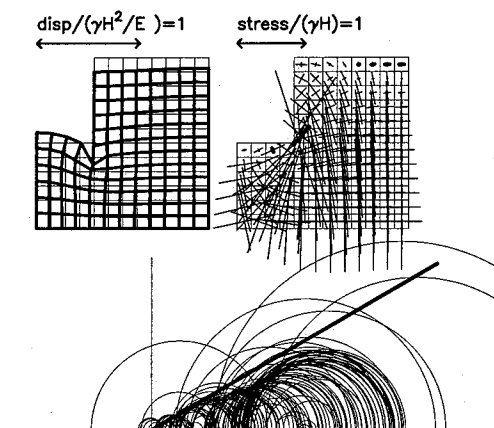


図-12 掘削底面からの排水（周面摩擦なし）

定上の模擬計算であるが、空気圧の効果を見る1つの方法である。その結果を図-12に示す。すなわち、掘削底面における水圧を0にして浸透解析を行ない、それから求まる間隙水圧分布から浸透荷重を作用させた結果である。浸透を許すことにより掘削底面周辺の間隙水圧が低下するため有効応力が増加する。すなわち、各要素は破壊に対して少し安定側に移行する。しかし、その分だけ浸透圧密による地盤の圧縮が生じて地盤全体が大きく沈下している。すなわち、ニューマチックケーソン工法における掘削底面に作用する空気圧は、荷重としての効果のみならず、浸透による地表面沈下を許さないという「非排水効果」も含むことになる。実際、他の工法でディープウエル等の補助工法を用いた場合には、このような圧密沈下を生じることになる。

4.3 周面摩擦の影響

ケーソンが沈下するとき、一般には地盤から周面摩擦を受ける。そのためケーソンを沈下させるのが困難になることもある。そこで都市部における施工ではこの摩擦を軽減するため、ケーソン側壁に図-13に示す

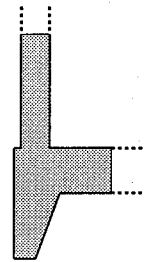


図-13 フリクションカット

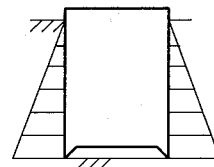


図-14 地盤に作用する荷重

ような幅25~50mm程度の「フリクションカット」とよばれる段差を設けることが多い。しかし、このような工夫を施してもケーソンと地盤には摩擦が必ず作用する。そこで周面摩擦が地盤の変形や応力にどのような影響を与えるか検討した。摩擦の分布は図-14のように深さとともに一定の割合で増加するものとし、かつ、最終段階で刃口反力が0となるように大きさを定めた。図-15はケーソンの沈設が完了した状態（第12段階）を表す。図-8と比較すればわかるように、周辺摩擦が作用する場合、刃口反力が小さくなるため刃口周辺にはそれほど応力集中は生じない。その結果、Mohrの応力円を見れば領域全体の応力状態は安定したものとなることがわかる。一方、周面摩擦を考慮すると刃口反力は減少するが、その鉛直下向きの力の成分は、より地表面に近い周面摩擦として受け持たれるため、地表面沈下を大きくすることになる。したがって地表面沈下を小さくせねばならないような場合には、周面摩擦を極力、小さくする工夫が必要となる。なお、図-16は、図-9に示すようにケーソン構築と沈下をそれぞれ1段階にして計算した場合の結果である。摩擦があるときにも逐次計算の回数でその結果に差異が生じることになる。

次に周面摩擦が作用する場合の掘削面における空気圧の効果を検討する。図-15の状態において掘削底面に作用する空気圧の作用を停止すると図-17のようになる。この場合にも図-11と同様に、掘削底面のいくつかの要素で引っ張り応力が生じるが、刃口周辺にはそれほど大きな応力集中は生じていない。これもやはり周面摩擦が刃口反力の増加を軽減しているからである。

さらに図-17の状態において掘削底面からの浸透を許すと図-18の状態となる。周面摩擦がないとき（図-12）と比較してやや大きい地表面沈下が発生している。

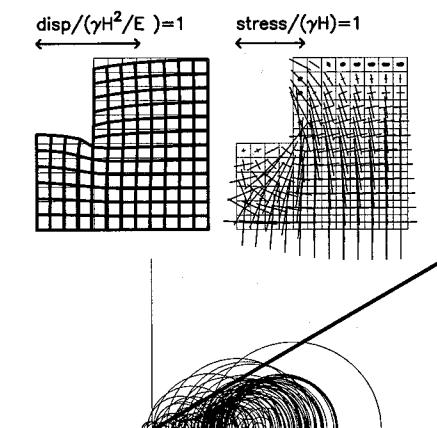


図-15 沈設完了状態（周面摩擦あり）

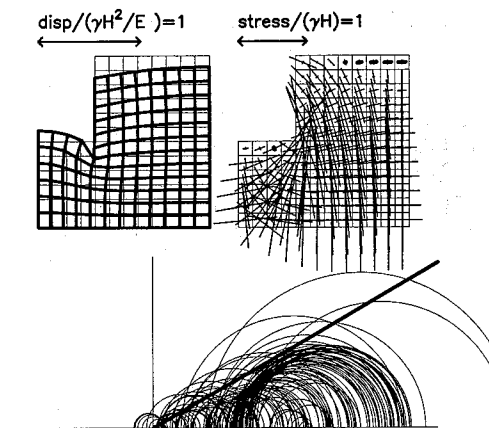


図-18 掘削底面からの排水（周面摩擦あり）

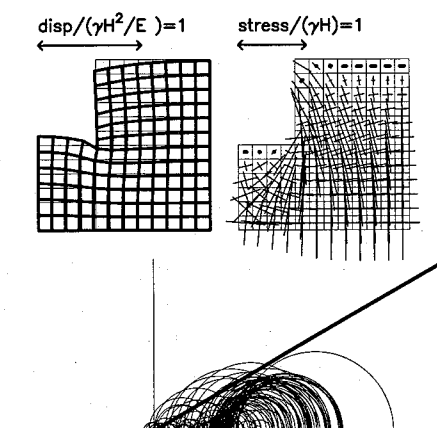


図-16 沈設完了状態（周面摩擦あり，2段階計算）

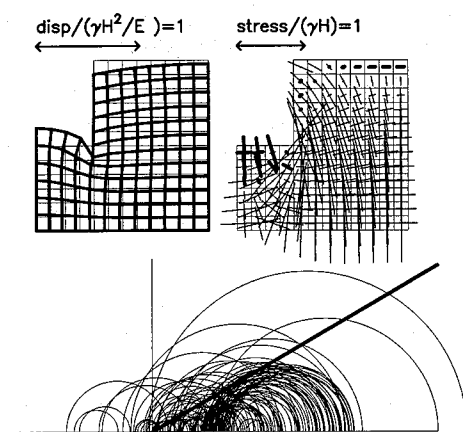


図-17 空気圧作用の停止（周面摩擦あり）

5. まとめ

本論文ではニューマチックケーソンによる地盤掘削の手順を簡単な力学モデルで表現することを提案し、有限要素法による数値計算例を通してこの工法の特徴を示

した。特に掘削底面に空気圧が作用することから、ケーソンの自重と刃口反力や周面摩擦との相互作用が加わるため、やや複雑な現象を追わねばならない。ここでは、それらをなるべく簡単な力学モデルに置き換えるとともに、それによる数値解析例を示しながらニューマチックケーソンによる地盤掘削の地盤工学的な利点を考察した。得られた結果をまとめると以下になる。

- 1) ケーソン自重のつりあい状態を考慮することにより、掘削底面の空気圧、刃口反力および周面摩擦との関係が明らかになる。これに周面摩擦の評価法を仮定すると刃口反力の大きさが求められる。
- 2) ニューマチックケーソンによる地盤掘削は、地下水圧との関係で見ると水中掘削と等価である。すなわち、全応力の変化は有効応力の変化である。
- 3) ニューマチックケーソンの自重は、掘削される地盤の自重に匹敵するため、掘削により除荷される力の総和はかなり小さくなる。そのため、他の工法を比較すると周辺地盤への掘削の影響は小さい。
- 4) 掘削底面に作用する空気圧は、掘削底面からの地下水の流出を防ぐ（：掘削施工性の向上）のみならず、ケーソン自重を分散させ、刃口反力の大きさや周面摩擦の大きさを軽減（：力学的安定性の向上）している。また、掘削底面からの浸透を阻止することから、周辺地盤の圧密沈下を防止（：近接施工性の向上）している。
- 5) 周面摩擦は刃口反力を小さくし、地盤内の応力状態を安定化させる一方、地表面およびその周辺の沈下を大きくする。したがって地表面沈下を小さくするためには、何らかの方法で周面摩擦を極力、小さくせねばならない。

本論文では、簡単なモデルを通してニューマチックケーソンによる地盤掘削の特徴を定性的に検討することを目的としているため、実際の施工データの分析は行なわなかった。また、地盤の構造骨格は等方線形弾性と

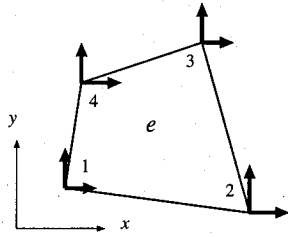


図-19 要素と等価節点力

仮定しているが、これまで計測データを用いて比較するためには、非線形性や異方性などさらなるモデル化が必要となるであろう。これらの課題については今後さらに考察する予定である。

付録: 要素除去による地盤掘削の数値解析

有限要素法において要素を除去しながら地盤の逐次掘削を解析する場合の計算方法およびそれに関して特に注意すべき点について説明する。ここでは Brown ら⁶⁾の方法よりももっと直接的な定式化を用いた。なお、簡単のため地下水の存在は考えない。

A-1 等価節点力

図-19 に示すような有限要素法における1つの要素 e を考える。 x, y 座標に基づく要素内の応力ベクトルおよび作用している物体力ベクトルをそれぞれ

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau \end{pmatrix}, \quad f = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \quad (8)$$

とする。仮想仕事の原理を用いれば

$$F = \int_e N^T \sigma n d\mathbf{c} \quad (9)$$

で定義される要素の等価節点力⁷⁾は

$$F = \int_e B^T \sigma dS - \int_e N^T f dS \quad (10)$$

として求められる。等価節点力 F は、力学的には図-19 に示す4つの節点に作用しているとみなす8つの成分からなるベクトルとみなすことができる。さて、応力 σ が生じ、かつ、物体力 f が作用している要素を除去する場合には、掘削相当外力として F なる節点力を逆向きに作用させることになる。なお、 B マトリックスの性質から式 (10) の右辺第1項から求められる力の成分の総和は0であり、また、形状関数 N の性質から第2項の成分の総和はその要素の自重に一致する。

A-2 要素除去と積分点

除去する要素ごとに式 (10) を用いれば、地盤掘削の数値計算ができる。一度に複数の要素を除去する場

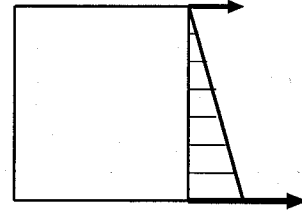


図-20 深さに比例する応力と解放力

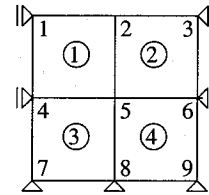


図-21 側方をなめらかに拘束された4要素

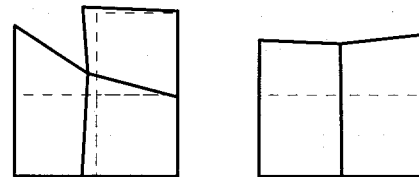


図-22 1点積分の結果

合にも、節点ごとにこれらを加え合わせればよい。ここでは有限要素法による初期応力 σ_0 の計算は行わず、単位体積重量 γ と深さおよび静止土圧係数 K_0 のみで初期応力を定めた。そのため応力 σ は

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma \quad (11)$$

の右辺第2項である増分応力 $\Delta\sigma$ のみ数値計算で求め、この σ を式 (10) に代入した。ここで注意すべきは式 (10) の右辺を数値積分するときの積分点の数である。たとえば要素中心の応力を代表させて式 (10) の右辺第1項を1点のみで計算すると誤差を生じることになる。実際、図-20 に示す1つの要素に深さに比例するような水平応力分布があると仮定する。この要素を除去する場合、右端の上下の節点に作用している2つの水平節点力を逆向きに与えることになる。三角形分布していることから、解放力は上下の節点で1:2とならなければならない。もし、これを要素中央の1点で積分を行なった場合、両者が平均化されるため、その比率は1:1となり、誤差を生じることになる。したがって、式 (10) の右辺第1項の積分は少なくとも4点で積分すべきである。むしろそのためには、掘削する要素の応力は4つの積分点で記憶しておかねばならない。

具体的な計算例を示す。図-21 のように Young 率 E 、Poisson 比 $\nu (=1/3)$ の線形弾性体からなる4つの正方

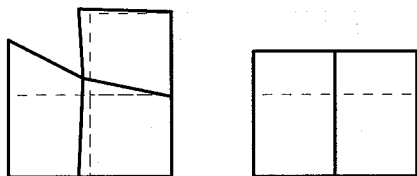


図-23 4点積分の結果 (1)

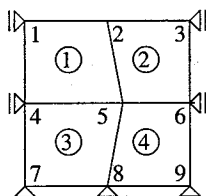


図-24 4つの台形要素の領域

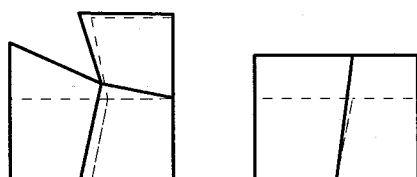


図-25 4点積分の結果 (2)

形要素の領域を考える。ここで Young 率 E の大きさは本質的でない。領域の上端は変位に関して自由面であり、その他の3辺は滑らかな境界とする。静止土圧係数 $K_0 = 0.5$ のもとで自重が作用しているような初期応力状態とする。このような単純なモデル地盤があって、上段の2つの要素を1つずつ2段階で除去（掘削）する。図-22は式(10)の右辺の積分を要素中心の1点のみで求めた等価節点力による結果である。左の図は上段左の要素1を除去したときの変形状態を表す。そして右の図は、引き続いて右の要素2を除去した結果である。新たにできた下段要素の掘削表面は除荷によって

上昇するが、この右図からわかるように一様な変位とならない。一様な弾性体を仮定していることから、2段階で除去しても、2つの要素1,2を一挙に除去しても同じ結果になるはずであるので、中段の3つの節点は同じ変位ベクトルを呈するのが自然である。ところが1点積分で掘削相当外力を計算するとこのような誤差を含む解を得る。一方図-23は、同じ問題に対して4つの Gauss の積分点で積分を行なった結果を示す。この場合は、2段階掘削後には一様な変形が生じることになる。そして、これは一挙に要素1,2を除去した結果と一致する。さらに図-24のように、あえて4つの台形要素で領域を分割した場合でも4つの Gauss の積分点を用いると結果は図-25に示すように、同一の変位状態が得られる。ここで説明した手法は線形弾性体ばかりでなく、弾塑性体などのいかなる非線形材料にも適用することができる。すなわち、計算過程において4つの Gauss の積分点での応力の値を記憶させながら掘削する直前の応力状態に関し、式(10)の右辺の数値積分を4つ Gauss 点で行なえばよい。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック、第4編 構造物各論、第3章 基礎構造物、3.5 ケーソン基礎、pp.872-885, 1999.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書、IV. 下部構造編・同解説、2002.
- 3) 日本圧気技術協会：ケーソン部会技術資料、2003.
- 4) 田村 武、足立 紀尚：トンネル掘削解析における領域設定について、土木学会論文集、No.701/III-58, pp.231-242, 2002.
- 5) 岩松 幸雄、駒田 敬一、工藤 真之助：ニューマチックケーソン基礎設計の合理化に関する研究、土木研究所報告、第149号、1997.
- 6) Brown, P.T. and Booker, J.R.: Finite element analysis of Excavation, Computer and Geomechanics, pp.207-220, 1985.
- 7) Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L.: The finite element method, Vol.1, 4th edition, McGraw-Hill, 1989.

(2006年4月13日 受付)