

ニューマチックケーソン工法によるトンネル 施工時の周辺地盤変形解析について

Numerical Simulation of Ground Deformation due to
Pneumatic Caisson Tunnel

井上智裕¹・藤井直¹・大内正敏¹・下間充²・田村武³

Tomohiro Inoue, Nao Fujii, Masatoshi Ohuch, Mitsuru Shimoma and Takeshi Tamura

¹正会員 (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)

E-mail:tomohiro@shiraishi.com

²正会員 清水建設(株) 土木東京支店工事長 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3-12 シーバンスS館)

³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)

A method of numerical simulation of the ground deformation due to tunneling accompanied by the sinking of the pneumatic caisson is proposed through a series of parametric studies. The normalized data of vertical and horizontal distributions of ground displacements obtained at three of the construction sites are examined. It is found through the present study that all of 1)the depth-dependent Young modulus, 2)the friction force on side wall and 3)the forced displacement into the cavity of frictioncut and scraped ground are indispensable to explain those data by the elastic finite element analysis.

Key Words : *pneumatic caisson, excavation, ground deformation,
elastic constant, forced displacement*

1. はじめに

ニューマチックケーソン工法(以下、ケーソン工法と称する)によるトンネル建設¹⁾は、昭和7年の大阪市の地下鉄工事が始まりである。堂島川と土佐堀川の横断箇所における開削工事において、土留め壁の鋼矢板が土水圧によって大きく変形し、掘削作業が不可能となった。そこで、平面的に細長いケーソンを沈設して土留め壁を補強するとともに、地下鉄の壁体として利用した。これを皮切りに、地下鉄御堂筋線の大国町、梅田工区など大阪の地下鉄工事では、ケーソン工法が多く採用された。東京においても、フランクロイド・ライト設計の旧帝国ホテルに近接した丸の内線の内幸町工区を始め、ケーソン工法は多数採用された。

当時のケーソン工法の選定理由は、軟弱地盤の深い掘削工事に対する施工の確実性と周辺地盤へ与える影響が小さいことであった。しかし、トンネルの深層化に伴うシールドトンネル工法の開発と発展や、開削工法の設計・施工法の確立等によって、トンネ

ル本体部としてのケーソン工法の採用事例は減少し、代わって発進・到達立坑の構築技術としての採用事例が増加した。

しかし、近年では都市の過密化に伴う近接工事の増加や開削工法の土留め壁根入れ部による地下水流動阻害が問題視されるようになり、根入れが少ないケーソン工法がトンネル工法の一つとして再認識されてきた。首都高六宮線のJR新幹線・埼京線をアンダーパスする箇所での道路トンネル工事²⁾では、十数年ぶりにケーソントンネル工法が採用され、営業線や建築等の近接構造物への影響を極力小さく抑えることができた。また、東京都の環状8号線南田中トンネル工事³⁾では、地下水流動保全を目的としてトンネル設置面より深く土留め壁を必要としないケーソン工法が採用された。

ケーソン工法は、施工時および竣工後における周辺地盤への影響が小さいことから採用されている。しかし、ケーソンの掘削沈設に伴う周辺地盤の変形を、定量的に予測する解析手法や理論は確立されていないのが現状である⁴⁾。

ここではまず、段階的に沈設されるケーソンの施工を模擬する解析手法を提案した。次に、ケーソン掘削沈設時における周辺地盤の計測結果から地盤の変形モードを示した後、地盤を弾性体とした有限要素法を用いてパラメトリックスタディを行った。結果を示し、周辺地盤の変形モードが計測値と一致する施工要因と地盤のモデル化について考察する。

2. ケーソン施工のモデル化

ケーソン施工によって周辺地盤に作用する荷重は、ケーソン沈設時にケーソンへ作用する荷重から評価する。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底面に作用させる。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、ケーソン自重は地盤からの接触面圧(反力)のほかに、掘削底面における空気圧で支えられる。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。またケーソンは、施工地点の地形条件、地盤構成や底面地盤の掘削状況等の施工条件によって、傾斜や水平移動を伴いながら所定の深度へ沈設される。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。しかし、傾斜や移動は、施工条件に起因する偏土圧やケーソン底面での不均一な支持等によって生じることから、ケーソンの水平方向のつりあいを考慮したケーソン施工のモデル化は複雑となるため、ここでは、沈設時のケーソン傾斜や水平移動による水平方向の作用荷重はないものと仮定し、ケーソンの自重に対する鉛直方向の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⁵⁾。

(1) ケーソンの施工順序と自重のつりあい

図-1は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

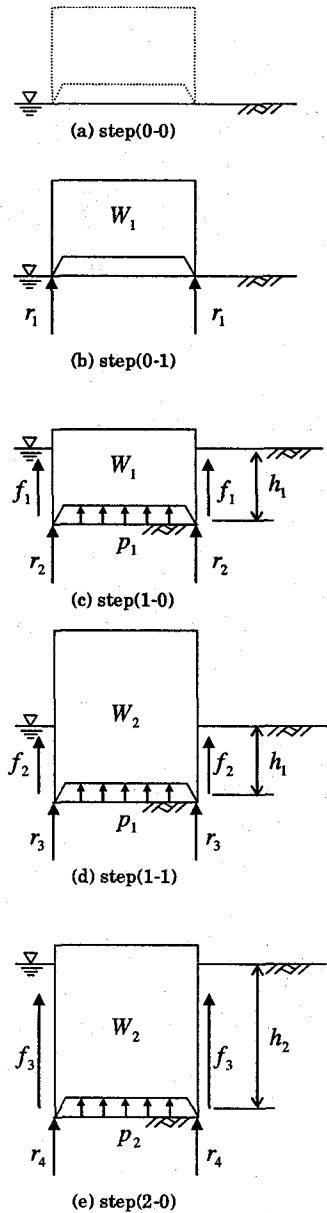


図-1 ケーソン施工過程とケーソンに作用する力の時点のケーソンの自重に関するつりあい式は

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

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力であり、それらの総和(面積分)を F_1 と書き

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

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単位面積当たりの空気圧であり、掘削深さを h_1 、地下水の単位体積重量を γ_w とすると $p_1 = \gamma_w h_1$ であ

る。なお、簡単のため地下水面は地表と一致するとし、ケーソン底面積を A とするとその総和 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

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

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水したり、あるいは適当な反力を取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、新たな周面摩擦力 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

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

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、周面摩擦力 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自重に関するつりあい式は

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

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

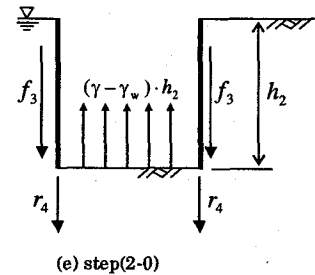
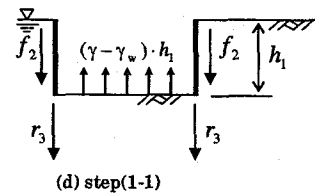
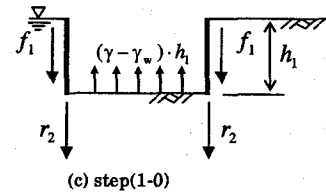
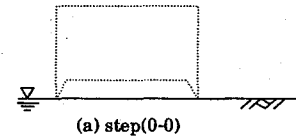


図-2 地盤に作用する荷重

をそれぞれ表す。

ここで示したケーソン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。それには周面摩擦力 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。この値は、例えば道路橋示方書⁶⁾では沈設状況が比較的良好の場合について、過去の実績から土質とケーソン深さに応じて示している。したがってこのような場合には、図-1で $f_1=f_2$ となる。

(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-2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 $p_1(=\gamma_w h_1)$ 、周面摩擦力 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。説明を簡単にするために、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、载荷されるのはケーソン自重であり、除荷されるのは掘削される地盤の全重量となる。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自重 $W_1(=\gamma_w Ah_1)$ 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、一般に周面摩擦力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) 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ので、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得ない。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-3に示す。(b)のstep(0-1)

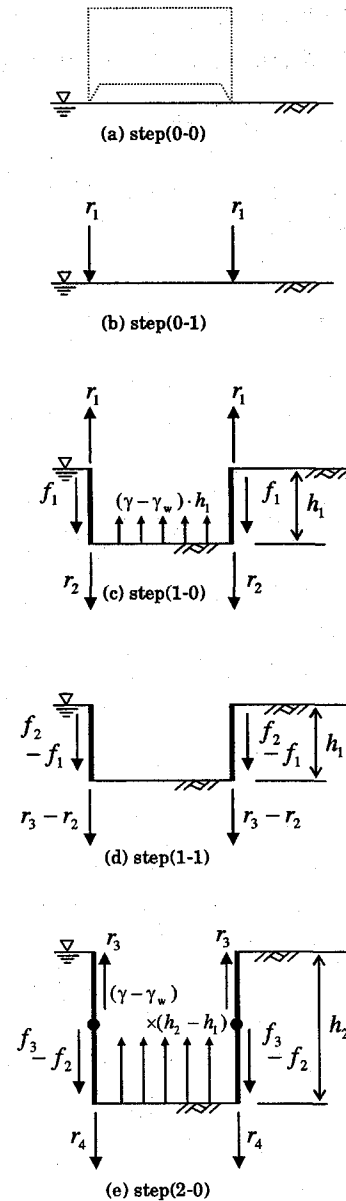


図-3 地盤に作用する増分荷重

は、図-2(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力 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辺摩擦力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要素の削除と空気圧の载荷を行えばよい。したがって、水中掘削と等価な計算であり、有効応力解析である。

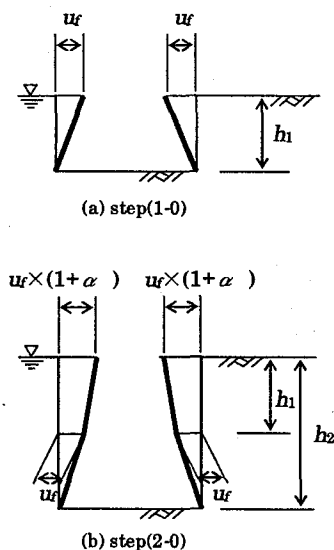


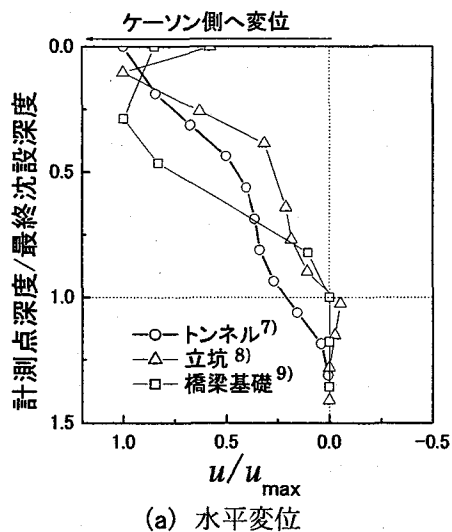
図-4 強制水平変位の定義

(4) フリクションカットによる空隙と周面摩擦による地盤切削

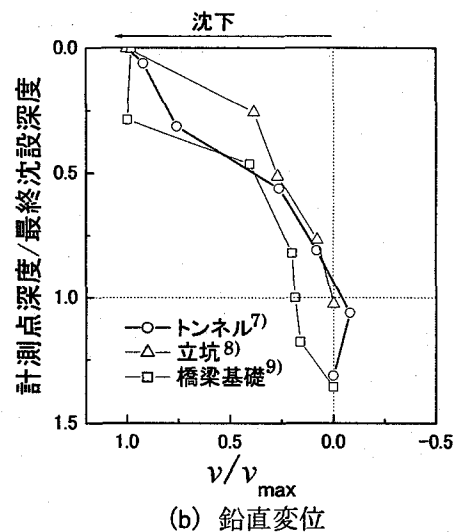
ケーソンは、沈設時にケーソン側壁に作用する周面摩擦を低減することを目的として、刃口付近に幅25~50mm程度のフリクションカットと呼ばれる段差を設けている。したがって、フリクションカットによってケーソン側壁と地盤との間には空隙が形成される。施工時の処理としてこの空隙に地表から砂や豆砂利を埋め戻す処理を沈設の度に行っているが、この緩んだ弱層の形成により、地盤はケーソン沈設と共にケーソン側へ変位すると考えられる。また、ケーソン周面地盤はケーソン沈設の度に周面摩擦力が载荷される。これはケーソンの沈設完了まで繰り返し行われ、周面地盤は沈設の度に少しずつ切削されると考えた。したがって、地盤切削分の水平変位がケーソン躯体方向へ生じ、数多く繰り返し切削されるケーソンに接する地盤の上部ほど、この変位は大きいと考えられる。

ここでは、フリクションカットによる空隙が地盤変形に及ぼす影響は、空隙の埋め戻し状況を考慮して、刃先通過後の掘削鉛直壁面に強制水平変位 u_f を付与することで評価する。地盤切削の影響は切削係数 α とし、2. (1)のstep(i-j)の添字iで表す掘削深さの段階の度に $u_f \times \alpha$ となる強制水平変位を付与することで評価する。したがって、 u_f と α はそれぞれ図-4のように定義される。

例えば第1リフト沈設後のstep(1-0)の状態においてフリクションカットによる空隙の影響は、図-4(a)に示すように地表面におけるケーソン側への強制水平変位 u_f として評価する。次段階、第2リフト沈設後のstep(2-0)の状態においては、第1リフト通過後の地盤において強制水平変位 u_f を与え、第2リ



(a) 水平変位



(b) 鉛直変位

図-5 地盤変形モード 7),8),9),10)

フト通過後の地盤では地盤切削の影響を、先行して与えた u_f に加えて強制水平変位 $u_f \times \alpha$ を与えることにより評価する。周面摩擦による地盤切削の影響はケーソンの沈設の度に繰り返されるため、各段階の沈設深さが一定と仮定するならば、地表面のstep(i-0)における強制水平変位量は

$$u_f \times \{1 + (i-1)\alpha\} \quad (8)$$

と表される。

3. 有限要素法によるパラメトリックスタディ

ケーソントンネル工事²⁾の施工実績データを参考にして数値実験を実施し、入力パラメータを検討した。

(1) 地盤変形モードの実測値

ケーソン工法により施工されたトンネル⁷⁾、立坑⁸⁾および橋梁基礎^{9),10)}の建設現場において計測された沈設完了時の地盤変位から、地盤変形モードを検討した。最大変位量とケーソン刃先の最終深度を基準にして、地盤変位を正規化した結果が図-5である。図-5(a)の水平変位モードは逆三角形の変位分布となり、ケーソン側へ変位する。図-5(b)の鉛直変位は、水平変位と同様に逆三角形の変位分布で沈下している。沈下量は地表面において大きく、深度が深くなるに従い小さくなる。水平および鉛直方向のいずれも、刃先深度より下方の地盤変位は微少である。

鉛直変位と水平変位の比を図-6に示す。地盤の水平変位は鉛直変位よりも卓越し、トンネルでは鉛直変位は水平変位の約2割、立坑と橋梁基礎ではこれより大きくなっている。その理由として、トンネル

のような2次元問題と、立坑や橋梁基礎のように作用土圧のアーチ効果が期待できる3次元問題の違いが挙げられる。

(2) 解析モデル

図-7に解析モデルを示し、図に示した断面位置の変位に着目する。想定現場はトンネルとし、ケーソン寸法は断面寸法(D)を16m、根入れ深さ(D_f)を32mとした。解析領域は近接基礎設計施工要領(案)¹¹⁾に示すケーソン沈設に伴う周辺地盤への影響範囲とDesai¹²⁾により提案された解析領域を参考に設定した。施工要領(案)では、影響範囲はケーソン底面端から水平面に対し $45^\circ + \phi/2$ の角度をなす直線より内側の領域となっており、Desaiによる解析領域は、鉛直方向に掘削幅の1/6の下方領域とし、水平方向に鉛直方向解析領域の3倍の領域としている。本解析では、鉛直方向の領域をケーソン底面から根入れ深さ D_f と断面寸法 D の小さい方までとし、側方の領域はケーソン壁面から $D_f + D$ までとした。

境界条件は、地表面を除く境界を剛でかつ滑らかとした。掘削面に関しては、鉛直壁面の鉛直方向に周面摩擦力、水平方向に強制水平変位が作用し、底面は掘削に伴う地盤解放応力が作用する。なお、刃先部については水平方向を固定とした。

解析条件は平面ひずみ条件とし、左右対称の半断面とした。施工過程は、太線で示す高さ2m毎の躯体構築と沈下掘削を繰り返すこととして、16段階の逐次計算とした。地盤定数を表-1に示す。また、2.で示したケーソン自重のつりあい式の計算に用いるトンネルにおけるケーソン自重、空気圧と刃先深度の関係の実測値^{13), 14)}と計算上のモデルを図-8に示す。地盤の単位体積重量は地表から最終沈設深度までの平均値 17kN/m^3 とし、ケーソンの換算単位体積重量 γ_c は 12kN/m^3 とした。また、簡単のため解析では地下水面は地表と一致すると仮定していることと、図-8に示す実例を精度よく模擬する目的で、便宜的に地下水の単位体積重量を 8kN/m^3 とした。また、ポアソン比は0.333とした。その他の解析パラメータは、表-2に示す影響要因をそれぞれ変化させたパラメトリックスタディを実施して、実測値との比較により設定法の適用性を検討した。

(3) Young 率の分布

地盤掘削に伴う地盤変位の数値計算において、最も重要で困難な問題はYoung率と解析範囲の決定である。これらを変化させることにより、定量的にもまた定性的にも種々の鉛直変位解を得る。想定現場

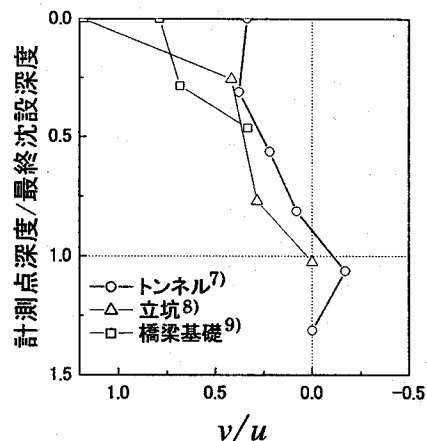


図-6 鉛直変位と水平変位の比 7), 8), 9), 10)

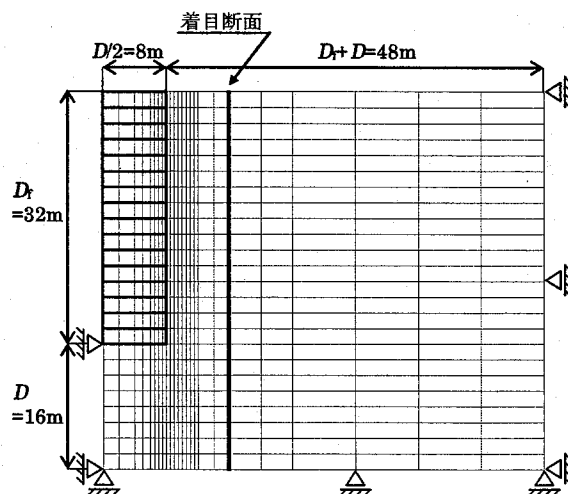


図-7 解析モデル

表-1 地盤定数

地盤の 単位体積重量	ケーソンの 単位体積重量	地下水の 単位体積重量	Poisson比
$\gamma (\text{kN/m}^3)$	$\gamma_c (\text{kN/m}^3)$	$\gamma_w (\text{kN/m}^3)$	ν
17	12	8	0.333

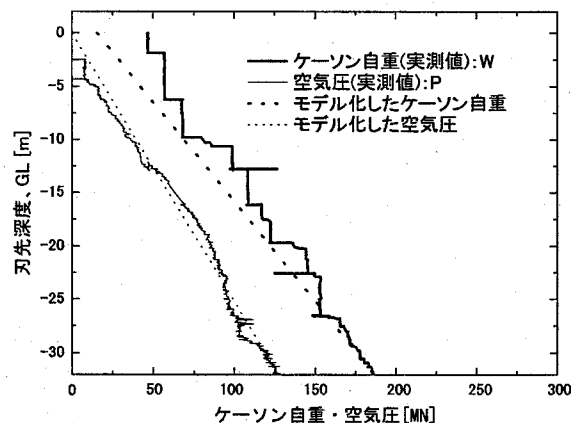
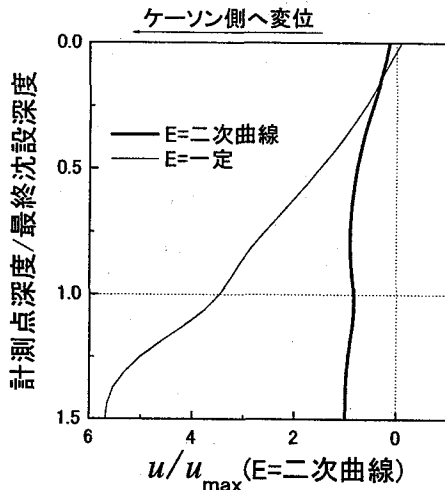


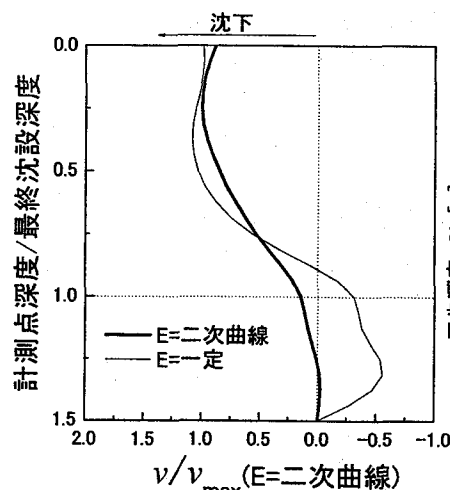
図-8 ケーソン自重・空気圧と刃先深度の関係の実測値とモデル化¹⁴⁾

表-2 解析ケース一覧

影響要因	解析ケース		
地盤のYoung率分布	二次曲線		均一地盤
周面摩擦の分担率	0%	25%	50%
ブライアンカットによる空隙と地盤切削	埋め戻しあり		埋め戻しなし



(a) 水平変位



(b) 鉛直変位

図-9 地盤変形モード

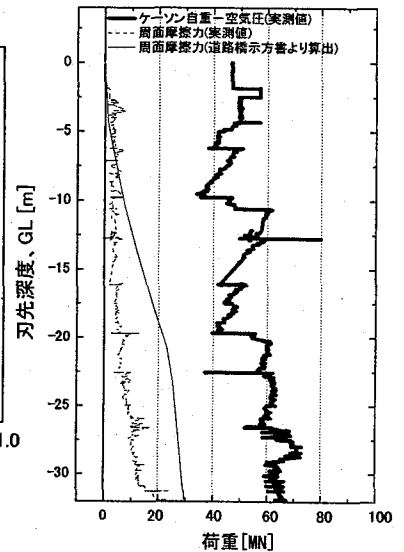


図-10 周面摩擦力の抵抗分担¹⁴⁾

は砂・粘土の互層地盤であるが、Young率が深さ方向に増加する地盤を仮定し以下のようにした。

Young率については田村ら¹⁵⁾がトンネル掘削の数値解析において、深さ(z)方向に z^β ($\beta > 1$)なる関数でYoung率が增大することが必要であることを明らかにしている。そこで、地盤のYoung率 $E(z)$ を

$$E(z) = a \left(\frac{z}{D_f} \right)^2 + B \text{ (MN/m}^2\text{)} \quad (9)$$

と、 $\beta > 1$ を満たす最も簡単な方法として深さ z の2次関数とした。 B は地表におけるYoung率の値 $E(0)$ であり、地表よりケーソン根入れ深さ D_f までの実測 N 値の平均値から算定した $20 \text{ (MN/m}^2\text{)}$ とした。 a については、ケーソン根入れ深さ D_f 以深の解析領域における実測 N 値の平均値から算定したYoung率が、根入れ深さ D_f におけるYoung率となるよう $53 \text{ (MN/m}^2\text{)}$ と設定した。

(1)で示した3件の現場実測データと比較しながら、2.で示したケーソン沈設の力学モデルを用いて数値解析を実施し、設定したYoung率の妥当性について考察する。まず、周面摩擦と水平強制変位(u_f)は0とし、Young率を二次曲線とした場合と均一地盤(Young率一定)とした場合を解析した。均一地盤のYoung率は地表からケーソン根入れ深さ D_f までの平均 N 値から算定した。解析結果は、Young率を二次曲線とした場合の水平および鉛直変位の最大値で無次元化し、地盤変形モードとして図-9に示す。

均一地盤の場合、図-9(a)より水平変位は深度が深くなるに従い大きくなり、図-9(b)より鉛直変位は深度が大きくなるに従い地盤が浮き上がる結果となった。一方、Young率を二次曲線とした場合、水平変位は均一地盤の場合と同様に、深度が大きくなるに従いケーソン側へ変位する。しかし、鉛直変位は刃

先深度以深が浮き上がらず、図-5(b)と比較しても実測値に近い結果となった。したがって、Young率の設定は二次曲線が妥当と判断した。

解析領域については、田村らが示したようにYoung率を二次曲線とすることにより、掘削解放応力による下方解析領域の大きさの影響は収束すると考えたが、図-9に示すように解析結果からも鉛直変位は実測値と近い変形モードが得られた。また、沈設最終深度より下方地盤では鉛直変位が微小となるとおり、下方解析領域の大きさの影響は収束していると考ええる。

しかし、依然としてYoung率の深度分布のみでは、水平変位の実測値を良く再現していないため、実測の変形モードと一致させるためさらに考慮すべき要因について検討した。

(4) 周面摩擦の効果

ケーソン側壁に作用する周面摩擦はケーソンの周辺地盤を引き擦り込む効果があると考えられ、ケーソン沈設による周辺地盤変形の大きな要因の1つである。そこで周面摩擦が周辺地盤の変位にどのような影響を及ぼすかを検討した。

ケーソン自重(W)から空気圧(P)を減じた荷重は、周辺摩擦力(F)と刃口反力(R)の総和である沈下抵抗力($U=F+R=W-P$)によりつり合いを保っている。当該のトンネル工事¹⁴⁾における上記の荷重と、摩擦計により計測した周面摩擦力の実測値を図-10に示す。周面摩擦力は沈設完了時において上記荷重(68MN)の約25%(17MN)を分担しているが、道路橋示方書⁶⁾による値(30MN)では、分担率は約44%程度と大きくなっている。計測された周面摩擦力は非常に局所的な値を基に推定されており、側壁全面に作用する真の周面摩擦力とは異なる可能性がある。そこで、周面

摩擦力はケーソンの沈下深さに沿って比例して増加するものとし、周面摩擦力の沈下抵抗力に対する分担率を変化させて検討した。

強制水平変位(u_f)を0とし、周面摩擦力の分担率を0, 25, 50%の3パターン設定し解析した。分担率0%とした場合の変位の最大値で解析値を無次元化した変形モードを図-11に、また水平変位と鉛直変位の比を図-12に示す。図-11より分担率の増加により鉛直変位は増加するが、水平変位には大きな変動は見られない。そこで、周面摩擦力の分担率は、図-10に従い実測値に近い25%とし、次の検討を行った。なお、周面摩擦力の分担率を25% (17MN) と設定した場合、分担率から逆算した周面摩擦力は、周面摩擦力による分担荷重 17MN をケーソン側壁部の総面積 2880 m^2 で除し、6 kN/m^2 となる。この値は周面地盤全体の平均値であるため、周面摩擦力を地表面において0 (kN/m^2) とし、ケーソンの沈下深さに沿って比例して増加するものとした場合、最終沈設深度において12 (kN/m^2) となる。また、各沈設深さにおける周面摩擦力の算出式は、沈設深さを h 、単位面積当たりの周面摩擦力を f とするとき $f=12 \cdot h/32$ (kN/m^2) となる。

(5) フリクションカットによる空隙と周面摩擦による地盤切削

フリクションカットによる空隙と周面摩擦による地盤切削の影響を検討する。フリクションカット幅が25mmの場合、ケーソンと周面地盤の間には25mmの空隙が形成される。図-13に示す埋め戻しありのCase-1は、フリクションカットにより形成した空隙の体積と切削された地盤の体積が同じになるように、沈設完了時において地表面で累計50mmとなる逆三角形分布のケーソン側への強制水平変位を仮定した。 $u_f=3.13\text{mm}$ 、 $\alpha=1$ とし、刃先通過後にケーソン側へ3.13mmの小さな強制変位を掘削壁面に付加させる。その後、各リフト(全16リフト)の沈設ごとに3.13mmずつの強制変位を付加した。埋め戻しなしのCase-2は、Case-1と同様に地表面で累計50mmの強制水平変位を仮定し、刃先通過後にフリクションカット幅25mmの強制水平変位が生じるとした場合である。 $u_f=25\text{mm}$ 、 $\alpha=0.067$ とし、各リフトの沈設ごとに $u_f \times \alpha=1.68\text{mm}$ ずつの強制変位をそれぞれ付加し、累計の強制変位分布は図-13に示すような台形分布となる。

図-14に、変位の最大値で無次元化した変形モードの解析値と実測値を示す。地盤変形モードは、上述の強制変位を考慮することにより実測値との対応が

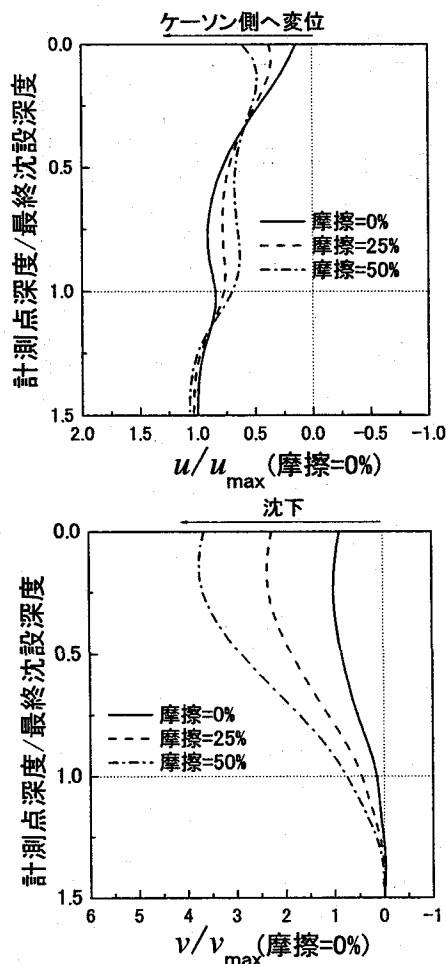


図-11 地盤変形モード

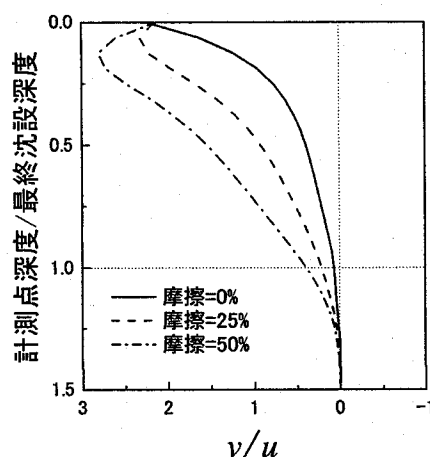


図-12 鉛直変位と水平変位の比

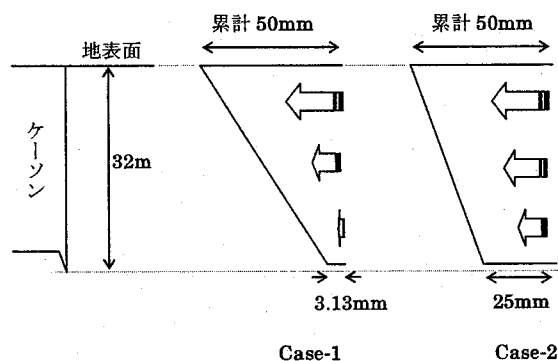


図-13 強制変位モデル

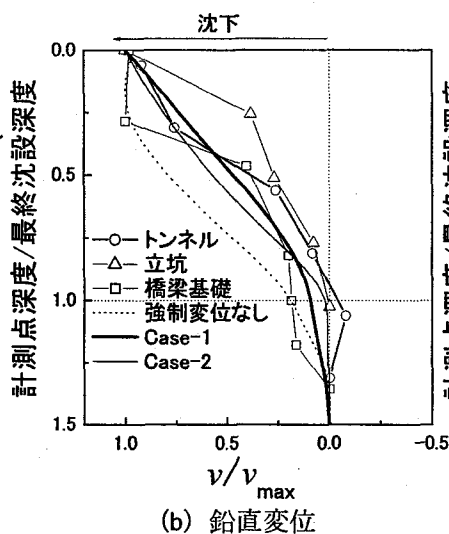
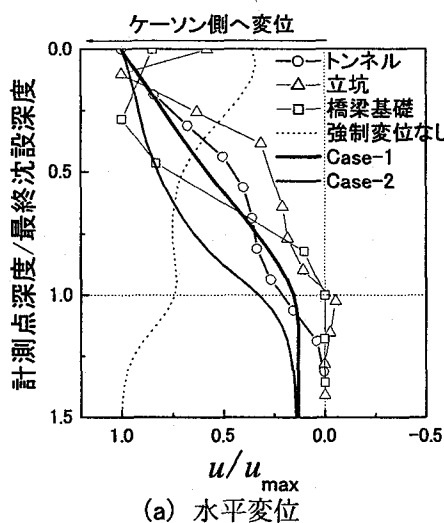


図-14 地盤変形モード

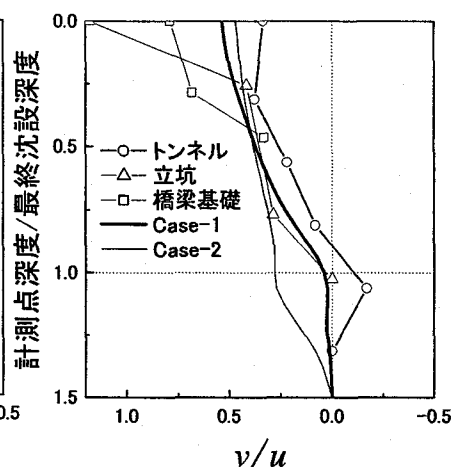


図-15 鉛直変位と水平変位の比

取れるようになった。また、図-15に水平変位と鉛直変位の比を示したが、実測値と同様に鉛直変位よりも水平変位が卓越する結果となった。水平変位に関してはCase-2よりもCase-1のほうが実測値の変形モードに近いことから、実地盤の挙動は刃先通過直後に大きく水平変位が生じるのではなく、フリクションカット空隙部の埋め戻し効果により施工に伴い徐々に水平変位が進行するものと考えられる。

4. まとめ

本論文では、ニューマチックケーソンを用いたトンネル施工時の地盤変位の予測を行う目的で、数値計算モデルを作成するとともに、計測データとの対応を付けるためのいくつかの考察を行った。

まず、解析モデルについては下記の項目を新たに配慮した。

- 1) ケーソンによる地盤掘削では、単に地盤の自重が除荷されるだけでなく、掘削底面の揚圧力、ケーソンと地盤の間の摩擦力、刃口反力によるケーソン躯体のつりあいを加味した逐次解析は必要となる。ここでは、これらの要素をできる限り忠実に反映した力学モデルを用いた。
- 2) 地盤のYoung率を一樣と仮定する場合とともに、深さ方向に2次関数的に増大する場合を検討した。これは有限要素解析の領域設定に関連した重要な問題でありながら、これまであまり考慮されていなかったものである。
- 3) ケーソン施工では刃先周辺に設置されたフリクションカットによる地盤切削とともに、それに後続して発生する摩擦による地盤切削が考えられる。

ここでは地盤掘削に伴う除荷による地盤変位のみならず、これらの地盤切削による地盤の強制水平変位を導入した。

以上のモデルを用いた数値解析により、以下のことが明らかになった。

- 4) 地盤に一樣なYoung率を仮定した場合、掘削底面周辺で地盤が浮き上がるような鉛直変位が現れる。これは実測の傾向と大きく異なる。そこで上記2)のような深さとともに2次関数的に増大するYoung率を仮定すると実測値と類似の鉛直変位が得られた。
- 5) 地盤掘削の除荷のみを考慮した計算では、ケーソン側への水平変位のモードが実測値のモードとまったく異なることがわかった。すなわち、実測値では深さとともに水平変位が減少することに対し、一樣なYoung率による水平変位は深さとともに水平変位が増大する。この傾向は深さとともに2次関数的に増大するYoung率を仮定しても改善されなかった。そこで上記3)のようなケーソンと地盤の相互作用による強制的な水平変位を加味すると、実測値に極めてよく一致する水平変位分布を得た。また、鉛直変位と水平変位の比率の分布も計測データと類似のものが得られた。なお、強制的な水平変位を引き起こすケーソンと地盤の間の摩擦の大きさは、鉛直変位の大きさには影響を与えるが、水平変位自体にはあまり影響を与えない結果が得られた。
- 6) 以上のことから、「深さとともに2次関数的に増大するYoung率」と「強制的な水平地盤変位」を仮定することがケーソン周辺の地盤変位の予測に重要であることが明らかになった。

なお、今後の課題として

- 7) 本予測手法の精度を高めていくため、地形条件、地盤構成、底面地盤の掘削状況や躯体の傾斜や水平移動等の施工条件による相互作用の影響を反映させた強制変位の設定方法とともに、地盤変位の絶対値予測法の確立、
 - 8) ケーソン施工に伴う地盤変位を軽減する効率的な防護工の設計のあり方
- についてさらに検討する予定である。

参考文献

- 1) 大内正敏, 藤井直 : 土木いまむかし, ニューマチックケーソン工法(3), どぼく技士会東京, 第28号, pp.22-26, 2004.
- 2) 東海林洋悦, 石田芳行, 加茂野耕太郎 : 橋梁の基礎技術を使ったトンネル工事, 橋梁と基礎, Vol.36, No.5, pp.2-9, 2002.
- 3) 島田剛, 竹石英之, 木佐貫徹, 山本佳正 : 地下水流動阻害対策工としてのニューマチックケーソン工法, 基礎工, pp.74-77, 2006.3.
- 4) 藤井直, 増子康之, 大内正敏, 加茂野耕太郎, 下間充, 田村武 : ニューマチックケーソン沈設に伴う地盤変形解析, 第37回地盤工学研究発表会, pp.1533-1534, 2002.
- 5) 梅田法義, 藤井直, 井上智裕, 大内正敏, 下間充, 田村武 : ニューマチックケーソン施工課程の数値解析, 応用力学論文集, Vol.9, 2006.
- 6) 道路橋示方書・同解説, 社団法人 日本道路協会, I 共通編 IV下部構造編, pp.300-301, 2002.
- 7) 桑原清, 本多伸弘, 藤井直, 田村武 : ニューマチックケーソン連続施工時の周辺地盤挙動について(その1), 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.57, 部門4, pp.163-164, 2002.
- 8) 渡辺豊, 桑原弘昌, 富所達哉 : ケーソン工事に伴う周辺地盤の物性変化について(その2), 第23回土質工学研究発表会, pp.177-178, 1988.
- 9) 佐久間智, 前川利聡, 宮内秀敏 : ヘリウム混合ガス併用無人化掘削工法による大深度ニューマチックケーソンの近接施工, 土木技術, Vol.50, No.11, pp.54-65, 1995.
- 10) 石井通夫, 中西哲也 : ニューマチックケーソン工事における情報化施工, 基礎工, Vol.27, No.6, pp.42-46, 1999.
- 11) 土木研究所資料 近接基礎設計施工要領(案), 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室, pp.8-12, 1983.
- 12) Desai, C.S. : Theory and Applications of the Finite Element Method in Geotechnical Engineering, Proc. Application of the FEM in Geotech., Eng., Vicksburg, Vol. 1, pp. 3-90, 1972.
- 13) 藤井直, 篠瀬直樹, 齋藤裕二, 高橋正則 : 圧入工法を併用したニューマチックケーソンの沈設時における作用外力, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.57, 部門3, pp.243-244, 2002.
- 14) 長澤達明, 下間充, 田中博章, 井上智裕, 石田芳行 : 圧入工法を併用したニューマチックケーソン工法の沈下関係について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.57, 部門3, pp.245-246, 2002.
- 15) 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.