

ケーソン沈設に伴う地盤変形と防護工による抑制効果の数値解析法 NUMERICAL SIMULATION OF GROUND DEFORMATION DUE TO PNEUMATIC CAISSON WORK USING PROTECTION WALL

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 OHUCHI・Mitsuru SHIMOMA・Takeshi TAMURA

Pneumatic caisson method is one of the construction method adopted for construction of underground space structure such as tunnels and others. In Pneumatic caisson work in urban area, though a supplementary method as protection wall was adopted in consideration of the influence on the adjacent structure, the design method of the protective wall has not been established yet. Then, authors suggested the prediction method of the ground deformation as the numerical simulation by the elasticity finite element method. In this study, Authors discussed modeling of protection wall and considered the mechanism of ground deformation due to pneumatic caisson work. Therefore the notes in the protection wall's modeling and the effect of protection wall in the mechanism of ground deformation due to pneumatic caisson work were clarified.

Key Words : pneumatic caisson, underground structure, ground deformation, protection wall, numerical simulation

1. はじめに

地下空間を構築する施工技術は多岐にわたり、地下空間の形状や地盤状況により選定される。ニューマチックケーソン工法（以下、ケーソン工法と称す）は、橋梁基礎工法とのイメージが強いが、道路トンネル¹⁾を始めとし、各種の地下空間造成技術として活用されている。ケーソン工法は平成13年に施行された大深度地下使用法により、都市部における大深度立坑の施工法として、また、開削工法と違い地下構造物下部に土留め壁等の根入れが無いことから地下水流動保全対策工法²⁾のひとつとして期待されている。ケーソン工法が地下空間の構築技術として用いられる大きな要因の一つは、施工経験から周辺地盤への影響の小さいことであり、近接施工となる都市部での適合性が極めて高い工法の一つである。しかしながら、ケーソン工法においても少なからず掘削周辺地盤は変形するが、設計段階における地盤変形の予測手法は経験式等に限られている。また、有害な地盤変形に対しては防護壁等の補助工法を用いるが、この設計は経験的に決定しているのが現状である。著者ら^{3) 4)}は、実挙動を再現できる数値解析手法について検討を重ねており、ここでは、防護壁を考慮した解析手法について検討した。

2. ケーソン施工のモデル化

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。

キーワード：（ニューマチックケーソン、地下構造物、地盤変形、防護工、数値解析）

¹正会員 (株)白石 技術本部技術開発部

²正会員 清水建設(株) 土木東京支店

³正会員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

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-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位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

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

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

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

である。

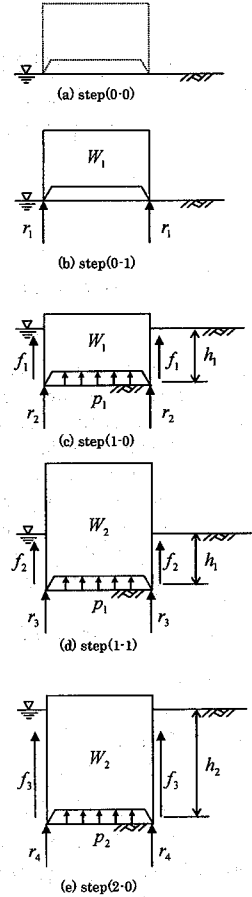


図-1 ケーソン施工過程とケーソンに作用する荷重

(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

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

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。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、載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、地盤全体の載荷、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_i による除荷の総和、つまり、地盤の自重 $\gamma A h_i$ と、載荷されるケーソン自重 $W_i(=\gamma A h_i)$ の大小比較により、地盤全体として除荷されたか、あるいは載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

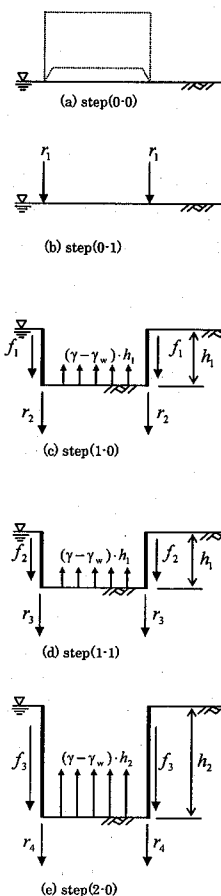


図-2 地盤に作用する荷重

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)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面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。

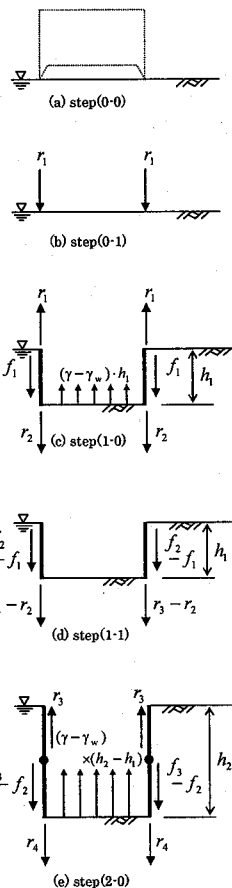


図-3 地盤に作用する増分荷重

(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行なっているが、少なからずケーソン周辺地盤の変形に影響を及ぼす。また、ケーソン周面地盤はケーソン沈設毎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。特に、ケーソンに接する地盤の上部ほど数多く繰り返し切削されるため、ケーソン躯体方向へ大きく変位すると考えられる。ここでは、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を、強制水平変位 u_f と切削係数 α として図-4のように定義した。すなわち、例えば第1リフト沈下後の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)に示すようにケーソン側への強制水平変位 u_f として評価した。

そして、フリクションカットを設けた第1リフト通過後のstep(2-0)の状態において、周面摩擦による地盤切削の影響は、 u_f に切削係数 α を乗じ、 $u_f \times \alpha$ を u_f 同様の強制水平変位として評価することとした。切削係数 α の影響はケーソンの沈下とともに進行し、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)における強制変位量は

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

と表される。

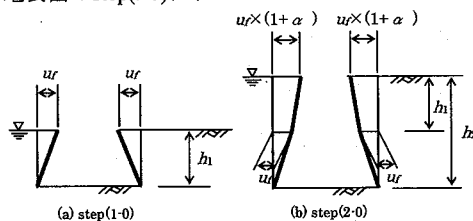


図-4 強制水平変位の定義

3. 有限要素法による防護工効果の解析

有限要素法による防護工効果の検討は、著者ら³⁾が検討している逐次解析によるケーソン周辺地盤の変形解析モデルを用いて行った。防護工効果はケーソントンネル工事⁵⁾の実績を参考に検討した。

(1) 解析モデル

図-5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)⁶⁾に示すケーソン沈設に伴う周辺地盤への影響範囲とDesai⁷⁾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° + ϕ /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、鉛直掘削壁面は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、底面は地盤の掘削解放応力が作用する。なお、刃先部の水平方向は、2. (1) に示した施工過程step($i-j$)の添字 j が0である当該リフトの沈設完了後は自由とし、添字が1である次リフトの構築直後は固定とした。また、防護壁位置はケーソン躯体より1m離れとした。

解析は平面ひずみ条件下における弾性解析とし、解析領域は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、掘削深さが16段階の逐次計算とした。

解析パラメータを表-1に示す。ケーソン自重、空気圧および地下水の単位体積重量は、図-6に示す実例⁸⁾⁹⁾を精度よく模擬する目的で便宜的に設定し、他のパラメータは著者ら⁴⁾の検討を参考に設定した。

(2) 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。対象現場は砂と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。

田村ら¹⁰⁾は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

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

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 $20(\text{MN/m}^2)$ 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 $53(\text{MN/m}^2)$ と設定した。

(3) 防護工のモデル化

防護壁はソリッド要素とし、ケーソン躯体より1m離れの位置から要素幅50cmの1要素列にて深さ方向に要素分割した。防護壁はBH杭とし、曲げ剛性から換算したソリッド要素のYoung率を表-2に示す。防護壁の根入れは、ケーソン根入れ深さと同一の $L=32\text{m}$ とし、掘削最終段階の深度32mにおける防護工効果の検討を、ケーソン躯体から2.5m離れた図-5の着目断面について行った。計算結果は、防護壁がない場合の水平および鉛直変位の最大値($u_{\max}$, $v_{\max}$)でそれぞれ無次元化した。地盤変形モードとして表した計算結果を図-7に示す。(b)より防護壁がある場合、鉛直変位が抑制されているのが判る。これはケーソン周面摩擦による周面地盤の引き擦り込みの影響が、防護壁の鉛直方向の剛性および先端以深の地盤剛性によって、防護壁背面地盤への波及が抑制されたと考えられる。

一方、(a)の水平変位には変位抑制効果が見られない。図-8に防護壁背面における地表面の各要素の最小主応力分布を示す。防護壁を設置することで地盤の全体的な剛性が高められて、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模擬した掘削鉛直壁面への強制水平変位により、ケーソン近傍

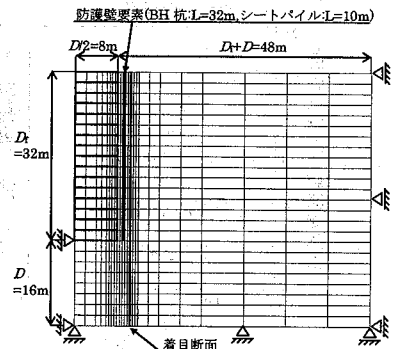


図-5 解析モデル

表-1 解析パラメータ

地盤の単位体積重量	γ (kN/m ³)	17
ケーソンの単位体積重量	γ_c (kN/m ³)	12
地下水の単位体積重量	γ_w (kN/m ³)	8
Poisson比	ν	0.333
強制水平変位	u_f (mm)	3.13
切削係数	α	1

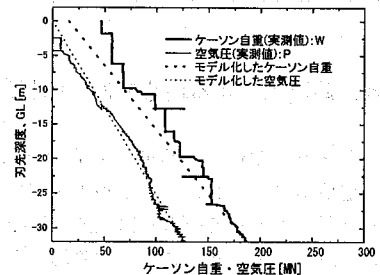


図-6 ケーソン自重・空気圧と刃先深度の関係の実測値とモデル化

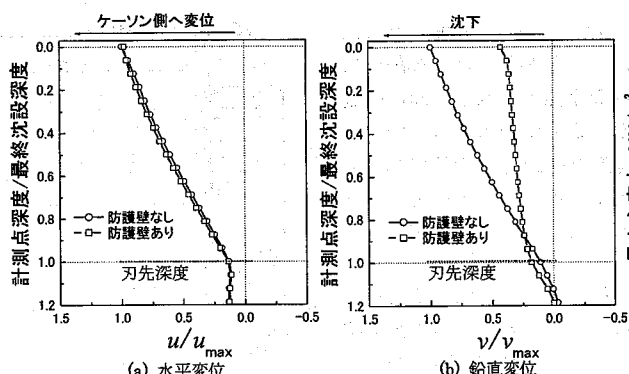


図-7 地盤変形モード

地盤において大きな引張力が発生する。そこで、ケーソン躯体に接する幅 1m 範囲の地盤に水平方向の Young 率を低下させた変形特性の異方性を考慮し、地盤に発生する大きな引張力を減少させることとした。この地盤要素は、ケーソン躯体と防護壁との間に 2 要素列として配置して、刃先通過後に水平方向の Young 率を 1/10 として深さ方向に逐次的に異方性を与えた。この結果、図-8 に示すように防護壁背面地盤に発生していた引張応力の減少が見られた。ここでの解析は線形弾性解析を基本とした研究を進めるため、簡便に異方性を考慮することで、No-tension 等の非線形解析手法は用いなかった。

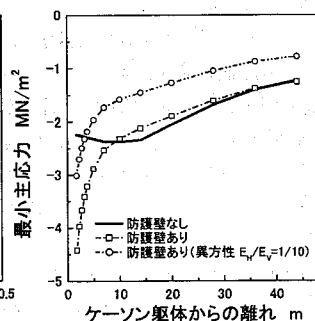


図-8 地表面の最小主応力分布

表-2 防護壁要素の Young 率

BH杭	シートパイル
$E(\text{MN/m}^2)$	$E(\text{MN/m}^2)$
8620	5630

4. 防護工による地盤変位の抑制効果

ケーソン躯体と防護壁との間の地盤に異方性を考慮し、現場実測データのシミュレーションを試みた。想定現場のケーソントネル工事では、BH 杭およびシートパイルの防護壁をケーソン側壁から 1.5m 離れた位置に施工している。BH 杭の根入れ長は地表面からケーソンの最終沈没深度と同じ GL-32m まで、またシートパイルの根入れ長は地表面から GL-9m までである。地盤変位の計測は、一基のケーソン平面位置において、BH 杭とシートパイルの背面側および防護壁のない箇所からケーソン側壁から 2.3m 離れた位置にて実施されており、地盤条件、ケーソン施工条件は全てほぼ同一と見なせる。

表-2 に現場シミュレーションに用いた BH 杭およびシートパイルの Young 率を、それぞれの曲げ剛性から換算した値を示す。

ここでは、地盤全体の変形傾向に着目し、変位の最大値で正規化した地盤変形モードについて検討した。

(1) 水平変位

図-9は、BH杭およびシートパイルの背面側と防護壁を施工していない箇所における水平変位に関する地盤変形モードの実測値と解析値である。なお図中にはBH杭とシートパイルの下端位置を示す。地盤変形モードは、刃先深度がGL-6m、GL-12mおよびGL-20mについて抽出しており、それぞれ防護壁がない箇所での最大変位量を基準にして、地盤変位を正規化している。(a)は刃先がシートパイル先端深度より上方にあり、(b)、(c)は刃先が下方にある状態である。実測値から、刃先通過前に刃先より下方地盤においては、掘削底面に作用する掘削解放応力の影響により微小な先行変位が生じ、刃先通過後は、ケーソン側へ大きな変位が生じる変形モードを示している。

(a)より刃先がシートパイル先端深度より上方(GL-6m)にある場合、実測値ではBH杭およびシートパイルとも地表面の水平変位が抑制されている。また、解析値においても防護壁による変位抑制効果を再現でき、変形モードの傾向をよく模擬できている。BH杭、シートパイルによる抑制効果の差もおおむね実測値と解析値は一致している。

(b)より刃先がシートパイル先端深度より下方(GL-12m)へ進むに伴い、実測値ではシートパイル打設部においてBH杭よりも上方地盤の変位が少しだけ大きく変形モードとなっているが、解析値においても同様

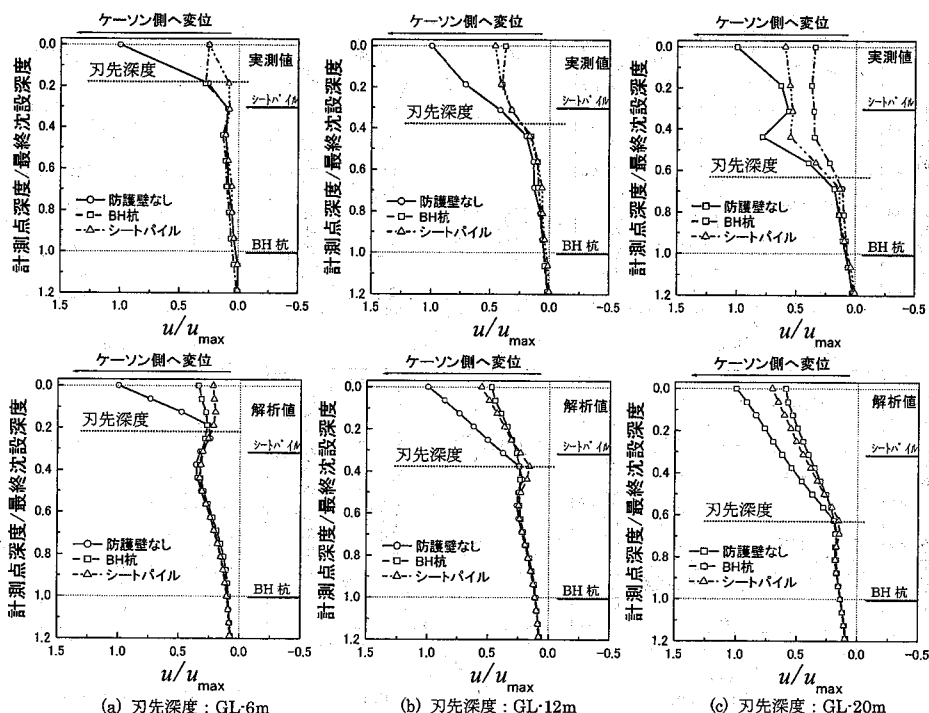


図-9 水平変位

の結果が得られており、変形モードの傾向をよく模擬できている。

(c)より刃先がシートパイル先端深度よりかなり下方(GL-20m)へ進むと、実測値ではシートパイル打設部において、根入れ効果が無くなり水平変位が大きくなっているが、変形モードはBH杭打設と類似している。これは刃先通過後においても、シートパイル打設部では変位抑制効果が存在すると考えられる。一方、解析値では、BH杭とシートパイルの打設部において変位抑制効果は見られるものの、実測値の変形モードは十分に模擬できていない。よって、より実情を反映した解析パラメータの設定が必要であると考える。

(2) 鉛直変位

図-10に示す実測値は、刃先より上方では沈下、下方では浮き上がる変形モードの反転が見られる。解析値もおおむね同様の傾向がうかがえる。

(a)より刃先がシートパイル先端深度より上方(GL-6m)にある場合、実測値では防護壁なしの箇所において刃先通過後に沈下が生じ、また刃先より下方では浮き上がっている。これは、地盤掘削による解放応力の影響を受けたためと考える。BH杭およびシートパイルの打設部では防護壁なしの箇所のような変形モードの反転は見られないが、これは防護工の鉛直剛性が浮き上がり防止に寄与しているためと考える。

一方、解析値においても同様の変形モードを示しているが、上向きに大きな変位が生じており、特に防護壁なしおよびシートパイルの打設部における地盤の浮き上がりがBH杭打設部に比べて大きくなっている。特に防護壁があると実測値に反して、地表面が沈下せず、特に刃先より下方で大きな浮き上がりが生じるのは、地盤のYoung率、防護壁のYoung率および周面摩擦力の設定方法に起因すると考える。

(b)より刃先深度がシートパイル先端深度より下方(GL-12m)へ進むに伴い、実測値ではシートパイルの根入れ効果が無くなり、刃先より上方地盤で沈下の変形モードが大きくなっている。また、解析値においても同様の結果が得られており、変形モードの傾向をおおむね模擬できている。(c)より刃先がシートパイル先端深度よりかなり下方(GL-20m)へ進むと、実測値では防護壁なしおよびシートパイルの打設部において、刃先通過後に刃先より上方では沈下が生じ、また刃先より下方では浮き上がる変形モードとなっているが、根入れの長いBH杭の打設部においては明確な変化が見られない。このことから、BH杭の打設部においては、ケーソン沈設に伴う周面地盤の引き擦り込みの影響が防護壁により抑制されていることが判る。また、解析値においても同様の結果が得られており、変形モードの傾向をおおむね模擬できている。

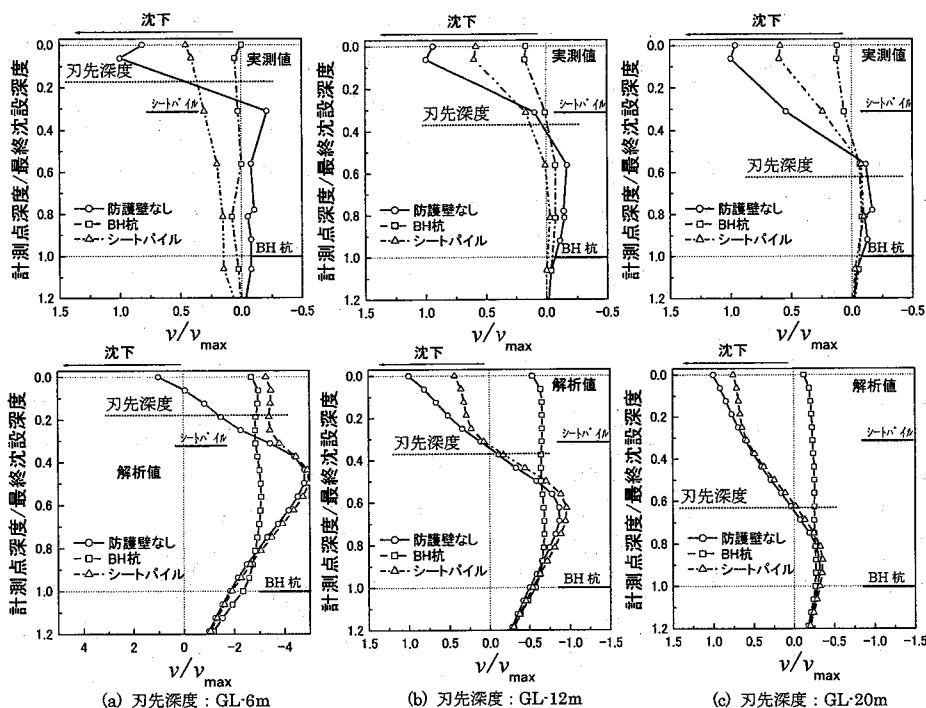


図-10 鉛直変位

5. まとめ

防護工を考慮したニューマチックケーソン施工に伴う地盤変形の予測手法の確立と防護工による変位抑制効果のメカニズムを解明する目的で、数値解析法による計算結果と計測データとの比較を行った。以下に本検討から得られた知見を示す。

- 1) 防護壁による変位抑制効果を再現するため、弾性解析に地盤の異方性を導入した。この結果、実測値におおむね合った地盤の水平変形モードが得られた。
- 2) 防護壁による変位抑制効果は、根入れ長および曲げ剛性に影響されることが明らかになった。

今後の課題は、地盤の異方性の定量的な設定方法とともに、地盤変形モードだけではなく地盤変位の絶対値の予測手法の確立であり、さらに検討する予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 井上智裕, 藤井直, 大内正敏, 下間充, 田村武: 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, 第16回トンネル工学研究発表会, 2006.(投稿中)
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 関澤達明, 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.
- 10) 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.