連壁の築造過程とシールド発進を考慮した円形立坑坑口部の設計手法に関する解析的考察

Study on The Design Method for The Entrance Wall of Circular Shaft That Takes into Account The Construction Sequences of The Diaphragm Wall and The Shield Tunnel

新井　泰[1]・日下部　治[2]
Yasushi Arai and Osamu Kusakabe

[1]正会員 工修（財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:araton@rtri.or.jp
[2]正会員 Ph.D 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

This paper describes a method of reflecting the three-dimensional effects in a two-dimensional structural analysis for the design of a circular deep shaft of a shield tunnel entrance. The method is based on the result of three-dimensional FEM for different structural conditions whether there is any ring beam or inside wall for a body of the shaft. We conclude that in the design of the entrance with the shaft using two-dimensional structural analysis, the analysis requires an effect of a restraint of a convergence movement of the diaphragm wall. The effect is conducted by spring elements and the using of it is expected to leads to reasonable specifications for diaphragm wall and inside wall for a body of the shaft.

Key Words :,Circular shaft; Diaphragm wall; Installation effect; Design method;Three-dimensional FEM

1. はじめに

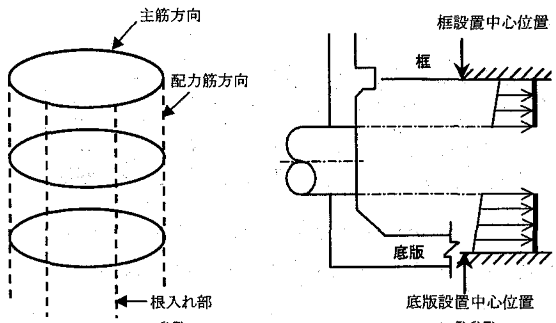
これまで大深度地下領域に築造された施設の多くは,シールドトンネルと立坑で構成されており,この傾向は今後も大きく変わらないものと推測される.

個々の設計技術に関して,いわゆる線状構造物であるシールドトンネルでは,二次元構造解析（以下,二次元解析）が広く適用されている．しかし,平面寸法に比べ鉛直寸法が大きく，独立した細長い構造を有する立坑では,三次元的な挙動（以下,三次元挙動）を示すため,二次元解析だけでは必ずしも合理的な設計を行うことができない．加えて,シールド発進に伴う開口(以下,シールド開口)の発生を想定する場合，同箇所の挙動はさらに複雑になるため，合理的な設計は,より一層困難になる.

立坑の三次元挙動を二次元解析に反映させるための手法に関して，矩形立坑では新井[1]，生山[2]が，円形立坑では岩波[3],堂々[4]が各種の検討を行っている．しかし,既往の指針[5)6)7]に記載されている坑口部の壁(以下,坑口壁)を片持ち梁に置換した現行設計法の適用性について,その三次元挙動と併せて検討した例は,矩形立坑の妻壁を対象とした新井[1]の検討程度であり,円形立坑の坑口壁を対象とした検討例は見当たらない．さらに円形立坑の坑口壁では,地盤のアーチ効果やその平面形状から導かれる円周方向応力が卓越する効果を踏まえ,矩形立坑の妻壁以上に二次元解析の適用性について確認する必要がある.

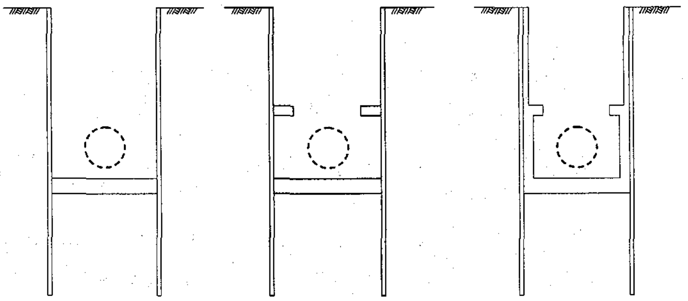
そこで本研究では，既往の指針[6)7]において,円周方向を主筋方向,鉛直方向を配力筋方向とみなすことができる一般部ではなく,応力分布の推定が困難で,面外変形が生じやすい坑口壁に対する新たな二次元解析手法の適用性について検討した.

具体的には，坑口壁の挙動を支配する同箇所の背面地盤応力を解析的に再現するために,連壁の築造から床付け掘削を経て,シールド発進・掘削に至る施工過程を三次元弾性FEM解析(以下,三次元解析）により表現し,その応答値として算定される坑口壁の断面力と二次元解析結果を比較した．その結果，二次元解析であっても面外変形を拘束する効果を表現できるばね(以下，仮想十字梁ばね)を取り入れた新たな解析手法を用いれば，現行設計法を用いるよりも合理的な結果を導くことができることを示した.



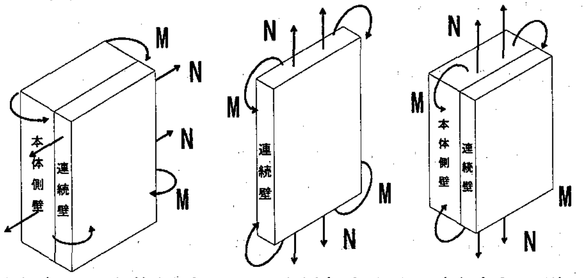
(a)一般部[6)7)]　　(b)坑口部[5)6)7)]

図-1　円形立坑の二次元解析モデル



(a)框無し　　(b)框有り　　(c)框・本体側壁有り

図-3　三次元解析におけるパラメータ



(a)連壁・本体側壁　　(b)連壁　　(c)合わせ壁

【円周方向】　　**【鉛直方向】**

図-2　三次元基準値を設定する部材と方向

2. 検討方針

(1) 概要

本来，三次元挙動を示す円形立坑の坑口壁を二次元解析モデルに置換するためには,当該解析に適用する荷重や境界条件が三次元挙動を包含できる内容である必要がある.具体的には,二次元解析から得られる断面力が三次元解析から得られる断面力と同程度かそれ以上になることが望ましい.

本研究では,三次元解析から得られる坑口壁の断面力を基準値(以下,三次元基準値)として,同箇所の二次元解析結果との比率から,当該解析手法の適用性について検討した.

(2) 三次元基準値の設定

既往の指針[5)6)7)]に記載されている円形立坑の二次元解析モデルを**図-1**に示す．坑口壁が無い場合,**図-1(a)**に示すように,円周方向を主筋方向,鉛直方向を配力筋方向とみなすことが可能である.

一方,坑口壁が有る場合,同箇所の応力分布を正確に推定できないことから，**図-1(b)**に示すように鉛直方向を主筋方向とみなすことが多い.

しかし,坑口壁でも地盤深度に応じた円周方向軸力が作用し,シールド開口の発生により,円周方向軸力が同開口の上下方向に再配分され,円周方向を主応力方向とみなせる可能性がある．その場合,**図-1(b)**に示す框および底版を支点とする片持ち梁のみを用いた現行設計法では合理的な設計は困難である.

そこで本研究では，連壁築造から床付け掘削を経て，シールド発進・掘削に至る施工過程を再現した三次元解析の応答値として算定される坑口壁の断面力を三次元基準値と定義することとした.

また，円形立坑の設計において，①円周方向の検討は,連壁単独あるいは本体側壁単独で行われることが多いこと，②鉛直方向の検討は,連壁単独または連壁と本体側壁の合わせ壁で行われることが多いこと，を踏まえ，三次元基準値は，円周方向では連壁と本体側壁の各々(**図-2(a)**)に設定し,鉛直方向では本体側壁が無い場合(**図-2(b)**)は連壁に,本体側壁が有る場合(**図-2(c)**)は合わせ壁に各々設定することとした.

(3) 框の有無が坑口部の挙動に与える影響

円形立坑では,2(2)で説明したような構造特性を有することから,通常の開削工法で用いられる切梁は不要となる．しかし,シールドの発進立坑として使用する場合,シールド開口の発生により,構造体としての剛性が低下し,面外変形が発生しやすくなる.

この場合，連壁の内側に框を築造することは,この問題点を解決するための有力な手段となるが,その効果を定量的に評価した報告は見当たらない.

そこで本研究では，2(2)で説明した三次元解析のパラメータとして**図-3**に示すような框の有無を選定し,シールド発進前後の坑口壁の円周・鉛直各方向の断面力の変化から,框の有無が坑口壁の挙動に与える影響について検討することとした.

(4) 本体側壁有無が坑口部の挙動に与える影響

2(2)で説明した三次元解析のパラメータとして,2(3)で説明した框の有無のほか,**図-3(c)**に示すような連壁の内側に築造する本体側壁の有無を選定し,それが坑口壁の断面力に与える影響について検討することとした.

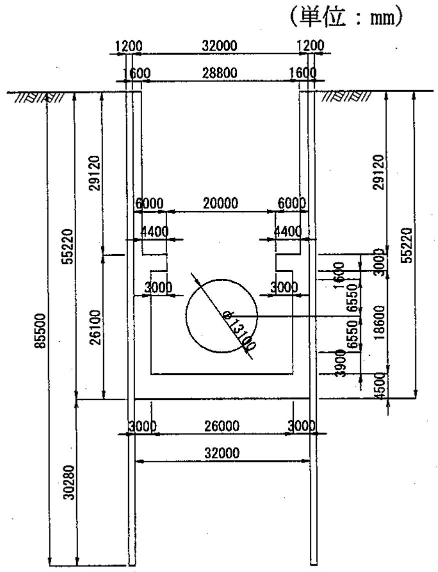


図-4 検討対象立坑の形状寸法[8)]

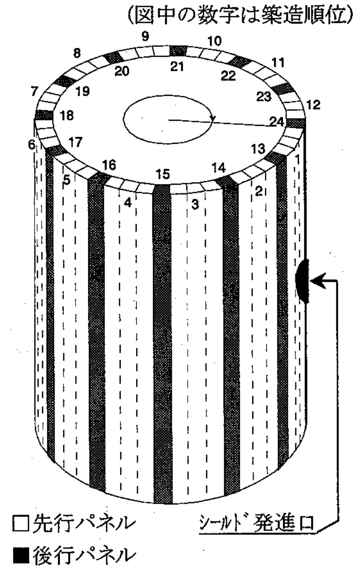


図-5 円形連壁の構成

表-2 円形連壁の諸元[8)]

項目	諸元	備考
連壁内径	32m	—
平面形状	48多角形	=48ガット
パネル数	先行：12	3ガット/1パネル
	後行：12	1ガット/1パネル
連壁厚	1.2m	—
連壁長	85.5m	RC構造部
ヤング係数	27MN/m^2	設計値

表-3 シールドトンネルとシールド機の諸元[12)]

セグメント	厚さ	0.5m
	幅	1.5m
シールド機	外径	13.1m
	機長	10.5m

表-1 地盤条件と地盤物性値[9)10)]

地盤種別	地盤深度 (G.L.－m)	E (MN/m^2)	ν
正規圧密沖積粘性土層 γ=16 kN/m^3 上載圧：5.0kN/m^2 c_u/σ_v' =0.3 E_{50}/c_u =250	0.0～5.1	4.9	0.48
	5.1～10.2	6.1	0.48
	10.2～15.3	7.2	0.48
	15.3～20.4	8.4	0.48
	20.4～25.6	9.5	0.48
洪積砂質土層 γ=18 kN/m^3 c=30 kN/m^2, φ=35度 G：土被り圧のべき乗[11)]	25.6～30.7	174.1	0.30
	30.7～35.8	190.4	0.30
	35.8～42.9	212.1	0.30
	42.9～52.7	240.8	0.30
	52.7～66.4	278.2	0.30
泥岩層　γ=18kN/m^3 E: 土被り圧によらず一定	66.4～300	400.0	0.48

3．解析条件

(1) 検討対象とした立坑の概要

検討対象とした立坑の形状寸法を**図-4**に,地盤条件を**表-1**に示す．プロトタイプは，連壁内径D=32m,深さH=55.5mの一般河川からの取水施設用立坑[8)]で,新幹線複線断面より大きい外径13.1mの地下調整池用シールドトンネルの発進基地として利用された．

構造的には，土留め壁である円形連壁の内側に本体側壁が別途築造されている．連壁にはシールド発進口が存在するが,本体側壁には築造時から坑口が存在している．また，当該坑口上部にはシールドの発進に伴う開口の発生を考慮して,桁高4.4mの框が本体側壁に取り込まれた形で築造されている．

地盤条件は，地表からG.L.-25.6m付近までが正規圧密沖積粘性土層，それ以深が洪積砂質土層および泥岩層となっているが,これは過去に都内で実施された他の大深度プロジェクトの施工実績ならびに東京都内を対象としたケーススタディ[9)10)]等と概ね等しくなっている．

(2) 地盤物性値

3(1)の地盤条件に基づいて設定した地盤物性値を**表-1**に示す．ここでは，泥岩層を除いた全ての地盤で土被り圧（拘束圧）依存性[11)]を考慮した．

(3) 連壁諸元

一般に円形連壁は，パネルと呼ばれる単位壁体を多角形に連ねて築造される．過去に施工された大深度立坑の連壁の多くは,**図-5**が示すように,先行パネルと称する平面寸法が大きいパネル（3ガット構成）と,後行パネルと称する平面寸法が小さいパネル（1ガット構成）を交互に配した構造となっており,築造順序は全先行パネル築造完了後,後行パネルを各先行パネルの間に順次築造し,円形連壁が完成する．

これらを踏まえて，検討対象とした立坑の連壁諸元は,プロトタイプの設計・施工実績[8)]を考慮して**表-2**のように設定した．

(4) シールドトンネルとシールド機の諸元

シールドトンネルとシールド機の諸元を**表-3**に示す．これらについては，プロトタイプとした立坑に接続するシールドトンネルの設計・施工実績[12)]を考慮して設定した．

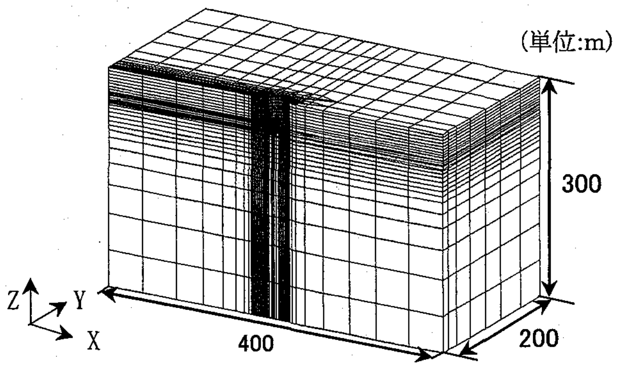


図-6 三次元解析モデル鳥瞰図（半断面表示）

4．三次元基準値を設定するためのFEM解析

(1) 解析モデルの概要

解析モデルの鳥瞰図を**図-6**に示す．解析には汎用FEM解析コードMARCを使用した．

解析種別は弾性解析とし，解析モデルの作成にあたっては，MARCの三次元用要素ライブラリーとして標準的な8積分点6面体要素と6積分点5面体要素（三次元ソリッド要素）を使用した．

平面方向の解析範囲の設定にあたっては，中央に円孔のある平板の両端に引張力を作用させた場合の応力分布について取り扱った問題[13]を参考にし，鉛直方向の解析範囲の設定にあたっては，本体床付け掘削の影響が及ばない範囲を確認の上,平面400m×400m，深さ300mとした．なお,当該モデルの節点数は48260,要素数は56124であった．

(2) 変位境界条件

モデルの側面でz方向変位を許容し，モデルの下面でz方向変位を拘束した．

(3) 円形連壁築造解析

a)先行・後行パネル築造過程の概要

連壁を構成する先行パネルの築造過程を**図-7**に,後行パネルの築造過程を**図-8**に示す．

また,円形連壁築造過程全体における,先行・後行各パネルの築造順位を**図-5**に示す．

解析対象とした築造過程において，3ガットで構成される先行パネルは,泥水を満たしながら，第1ガットを掘削→第3ガットを掘削→第2ガットを掘削→3ガット分の鉄筋籠を挿入，の後，コンクリートを打設して完成となる．

同様に 1 ガットで構成される後行パネルは，泥水を満たしながら，先行パネルにはさまれた 1 ガットを掘削→1 ガット分の鉄筋籠を挿入，の後，コンクリートを打設して完成となる．

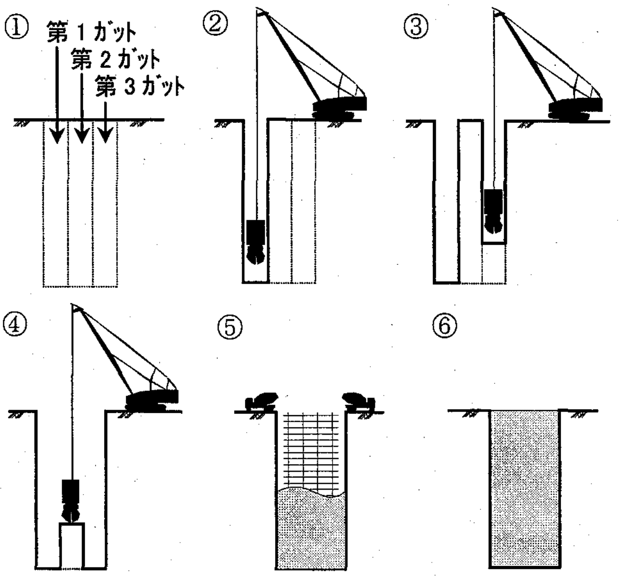


図-7 先行パネルの築造過程

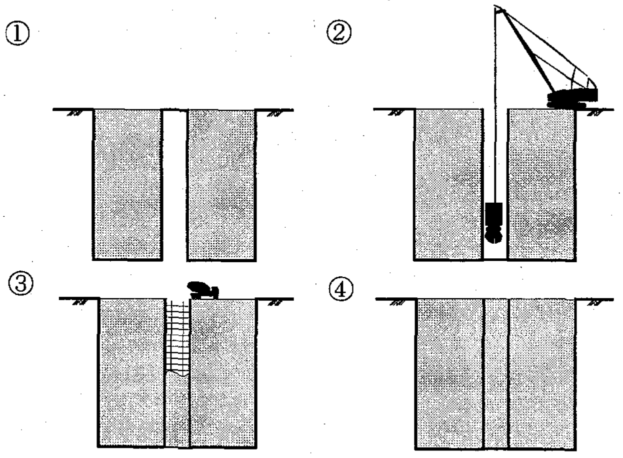


図-8 後行パネルの築造過程

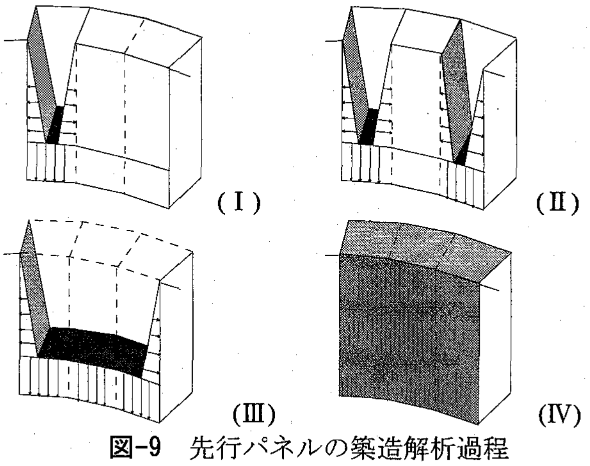


図-9 先行パネルの築造解析過程

b)先行パネルの築造解析

本研究では,先行パネルの築造過程を，同種の連壁築造解析[14)15)16)]で実績のある手法に倣い，**図-9**に示すように,(Ⅰ)第 1 ガットの地盤要素削除・要素周辺に泥水圧設定→(Ⅱ)第 3 ガットの地盤要素削除・要素周辺に泥水圧設定→(Ⅲ)第 2 ガットの地盤

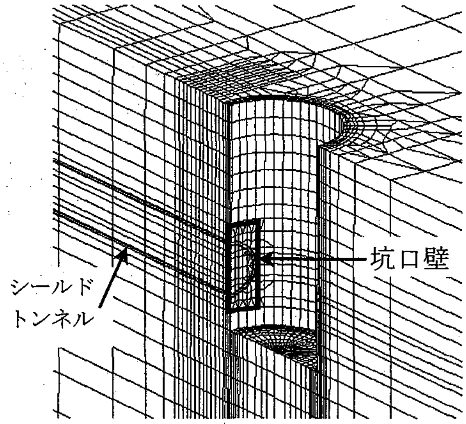


図-10 床付け掘削解析の状況（半断面表示）

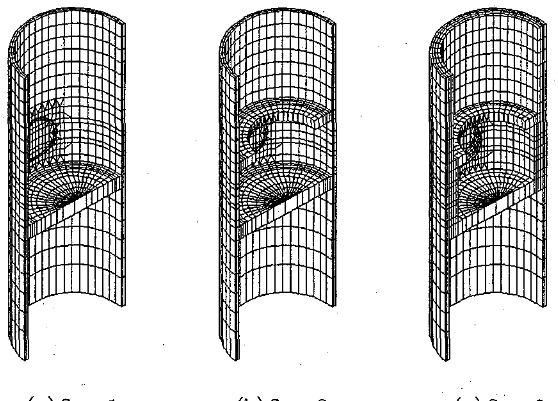


図-11 三次元解析ケース（半断面表示）

要素削除・周辺地盤要素に泥水圧を設定→(IV)泥水圧を除去し,コンクリートを模した弾性要素を挿入後に自重導入，の4段階で表現した．泥水の比重は1.10とした．なお，(IV)の段階での溝壁面の泥膜形成による地盤・コンクリート間の縁切り効果については，その実態が定量的に把握されていないため,既往の解析事例[14)15)16)]に則って連続とした．

また,FEM解析上のモデル化手法が定型化されていないガイドウォールの築造過程や,連壁施工機械（重機）の移動過程は検討から除外した．

c)後行パネルの築造解析

基本的な手法は先行パネルと同一で,先行パネルにはさまれた1ガットの地盤要素削除・要素周辺に泥水圧設定→泥水圧除去してコンクリートを模した弾性要素を挿入後に自重導入,の2段階で表現した．この際,両隣に築造されている先行パネルとの鉛直継手は,当該立坑の施工実績に基づいてコンクリートカッティングによる連続継手を想定し,先行パネルを模した要素と後行パネルを模した要素は連続とした．泥水の比重は，先行パネルの築造解析と同様に1.10とした．

(4) 床付け掘削解析と本体築造解析

対象立坑の床付け掘削深度は55.22mで，床付け掘削解析は,**図-10**に示すように,**表-1**に示した各標高の地盤要素のうち，先行・後行全24パネルの築造解析で設定された連壁要素に囲まれている地盤要素を1層ずつ順次削除することにより再現した．ここで,実施工で見られる各掘削面における掘削順序の差異は，弾性解析であるためモデル化しなかった．

床付け掘削解析に引き続いて,底版,框,本体側壁の築造解析では，該当要素を付加した後，自重解析を実施した．なお,本研究では,2(3)および2(4)で説明したパラメータに関する知見を得るために,**図-11**に示した3ケース,即ち,①連壁の単独本体利用を想定し,框および本体側壁は築造しないケース（以下，Case1）,②連壁の単独本体利用を想定し,框のみ築造し,本体側壁は築造しないケース（以下，Case2）,③プロトタイプと同様,框と本体側壁を築造するケース（以下，Case3）,を設定し，その時点の坑口壁の断面力をシールド発進前の三次元基準値とした．

(5) シールド発進・掘削解析

シールド発進口には,プロトタイプと同様,シールド機のカッタービットで直接切削できる材料が適用されているものとし，シールド発進解析は，シールド発進口位置にある連壁要素を削除することにより表現した．

また，シールド発進後のシールド掘削解析は,既往の研究[17)]の手法に倣い，①シールドトンネルとなる部分の地盤要素を1リングずつ削除するとともに,シールド切羽面地盤要素とシールド機長分の周面地盤要素に泥水圧を作用させる，②同時に，シールド機の後方にある1リング分の周面地盤要素から泥水圧を除去するとともに，セグメント要素を1リング分順次加える,③坑口壁と相対する側壁にバックアンカがあると仮定し，切羽圧相当の荷重を側壁の該当要素に入力する，という手順で表現し，この操作をシールド機テール部が坑口壁を抜ける段階まで繰り返した時点の坑口壁における断面力をシールド発進後の三次元基準値とした．

なお,泥水圧として,既往の研究[17)]ではシールド総推力の実績値を切羽面積で除した値を用いているが,本研究では当該実績値がないため，泥水圧作用位置の地盤深度に応じた全土被り圧に同位置のポアソン比から定まる静止土圧係数を乗じた値を用いている．

また，坑口壁要素とセグメント要素の節点は共通とし，両者の挙動は互いに従属関係を有している．

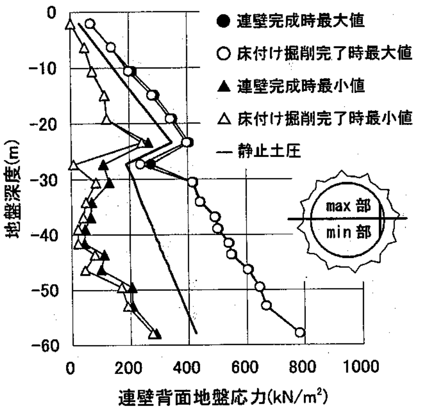


図-12 連壁背面地盤応力

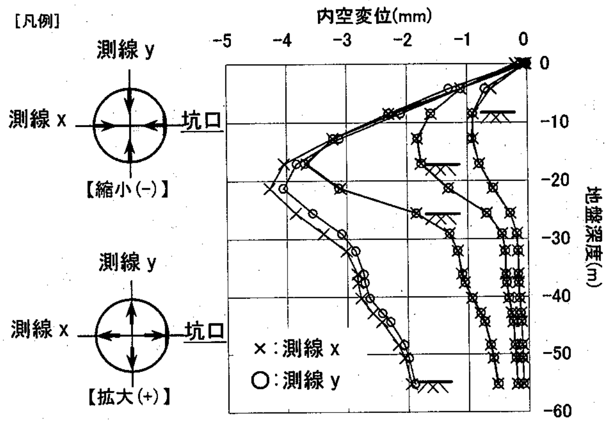


図-13 床付け掘削の進行と内空変位の変化

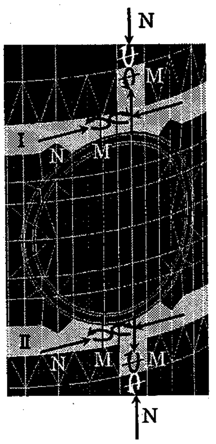


図-14 着目位置

表-4 シールド発進前後の坑口壁円周方向断面力

着目位置		坑口直上部（I）				坑口直下部（II）			
ケース番号		Case1	Case2	Case3		Case1	Case2	Case3	
着目部材		連壁	連壁	連壁	本体側壁	連壁	連壁	連壁	本体側壁
軸力 (kN/m)	発進前	3006	2698	2957	64	4259	4311	4454	308
	発進後	7166	4724	4396	1354	8276	7850	6377	1810
	変化率	2.4	1.8	1.5	21.2	1.9	1.8	1.4	5.9
曲げモーメント (kNm/m)	発進前	164	224	168	23	156	157	153	-33
	発進後	565	251	185	12	405	364	177	-177
	変化率	3.4	1.1	1.1	0.5	2.6	2.3	1.2	5.4

(6) 解析結果

a)連壁背面応力分布

図-12は，連壁完成時と床付け掘削完了時における全ての連壁背面地盤応力の各標高毎の最大値，最小値と静止土圧をプロットした結果である．

表-1に示した各地盤種別のポアソン比から定まる静止土圧は,最大値と最小値の中間に分布し,連壁完成時の最大値(●)と最小値(▲)の分布は,床付け掘削完了により，主働側(○,△)にシフトしている．

最大値と最小値が発生する理由としては,①4(3)b)で説明した先行パネル築造過程において,**図-9**の(III)が示すように,第2ガットは第1,第3ガットより遅れて掘削されるため,背面地盤のゆるみが最大になり最小値となる，②既往の研究[15)18)]にあるように，先行パネル築造時に解放された地盤応力が，後行パネル築造時に後行パネル背面地盤応力として局所的に再配分されて最大値となる,等が挙げられる．

b)床付け掘削時の内空変位

床付け掘削時の測線xと測線yの内空変位と掘削深度との関係を**図-13**に示す．当該変位は,連壁完成時を0として,床付け掘削の進捗に伴う純粋な増分変位である．これらの結果から以下の知見が得られる．

①連壁完成時から本体床付け掘削完了に至るまでに発生する内空変位は非常に小さく,最大で連壁内径の0.013%（4mm）程度である．

②測線xと測線yの変位分布はほぼ同一である．

③②の結果より,設計で考慮する偏圧の主な発生要因は,岩波[19)]の研究にあるような地下水位低下工法の施工過程や，コンクリート硬化過程で発生するひびわれ等による連壁の透水性変化にある．

c)シールド発進前後の坑口壁断面力

図-14に示す坑口直上部(I)と直下部(II)のシールド発進前後の円周方向断面力の変化を**表-4**に,坑口壁中央部の鉛直方向曲げモーメントの変化を**表-5**に示す．これらの結果から以下の知見が得られる．

①円周方向軸力（**表-4**）

1)変化率は框と本体側壁が無いCase1で最大になっており,框と本体側壁には,円周方向軸力の変動を低く抑える効果がある．

2)Case3の結果から,シールド発進後の本体側壁が負担する円周方向軸力は,坑口直上部および直下部ともに連壁の約30%程度となる．

3)框築造位置上方の一般部と同様に,坑口壁についても,円周方向軸力が卓越しており,円周方向を主応力方向と見なすことができる．

②円周方向曲げモーメント（**表-4**）

1)変化率は,円周方向軸力と同様に,框と本体側壁が無いCase1で最大になっており,框と本体側壁には円周方向曲げモーメントの変動を抑える効果がある．

2)変化量はCase1で最大となっているが，円周方向

表-5 シールド発進前後の坑口壁鉛直方向曲げモーメント

着目位置	框設置位置中心 (kNm/m)			底版設置位置中心 (kNm/m)		
ケース番号	Case1	Case2	Case3	Case1	Case2	Case3
発進前	-193	159	394	-56.3	-70.4	1100
発進後	-321	220	172	-66.4	-80.0	612
変化率	1.7	1.4	0.4	1.2	1.1	0.6

軸力レベルと比べてその数値は250～400kNm/mと非常に小さく，円周方向を主応力方向とみなすことができる.

③鉛直方向曲げモーメント（**表-5**）

1)框設置位置中心の変化率について，Case2はCase1より小さくなっており，框には鉛直方向曲げモーメントの変動を抑える効果がある.

2)合わせ壁で評価したCase3の変化率は，着目位置に関わらず1.0を下回っており，その変化量が200～500kNm/m程度で，円周方向軸力レベルと比べて非常に小さいことを考慮すると，坑口壁についても框築造位置上方の一般部同様,円周方向を主筋方向,鉛直方向を配力筋方向とみなせる可能性がある.

(7) 考察

円周方向軸力については,**表-4**のCase3の結果が示すように,シールド発進前後で連壁と本体側壁の分担率が必ずしも断面剛性比に則っていない.

これは,床付け掘削の完了と同時に,周辺地盤の挙動が円周方向のアーチ効果により安定し,それ以降,框や本体側壁が築造されても大規模な応力再配分が発生しないことに起因していると考えられる.

この現象は地山のアーチ効果を見込むNATMの概念に近く,連壁が一次支保の役割を,框あるいは本体側壁が二次覆工の役割を担っていると考えられる.

また,同様な設計思想を生かした円形地下構造物の施工実績[20]も存在することを考慮すると,これらの結果は概ね妥当であると判断できる.

円周方向曲げモーメントについては，連壁の単独本体利用を想定しているCase1とCase2で，シールド発進前後の変化率,変化量ともに若干大きくなっている．これは,シールド発進によって，一般に円形立坑の設計で用いられる偏圧とは別の意味での「偏圧」が発生していることを意味している.

鉛直方向曲げモーメントについては,坑口壁においても円周方向軸力が卓越する関係で,シールド発進前後で大幅な構造諸元の変更を要するほどの変化は発生していないことがわかる.

5．シールド開口発生後の坑口壁二次元解析手法

(1) 概要

2(2)で説明したように,現行設計法においては,框および底版を支点とする片持ち梁のみを用いているが,シールド開口付近の複雑な応力状況や面外変形を適切に表現できる解析手法とは言い難い.

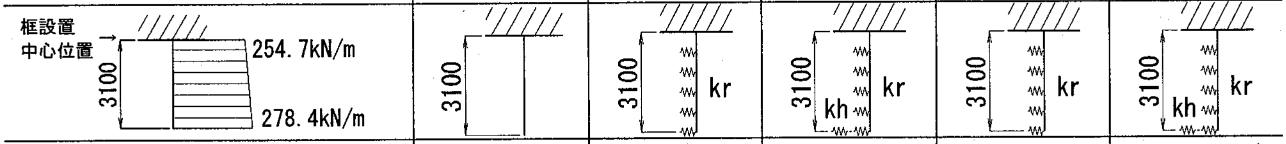
そこで本研究では,既往の指針[5)6)7)]に記載されている現行設計法以外に,円形立坑坑口壁特有の挙動を表現できる,現行設計法に基づいた新たな二次元解析手法を2種類提案し,それらから得られる結果と三次元基準値との比較を行った.

(2) 新たな二次元解析手法の提案

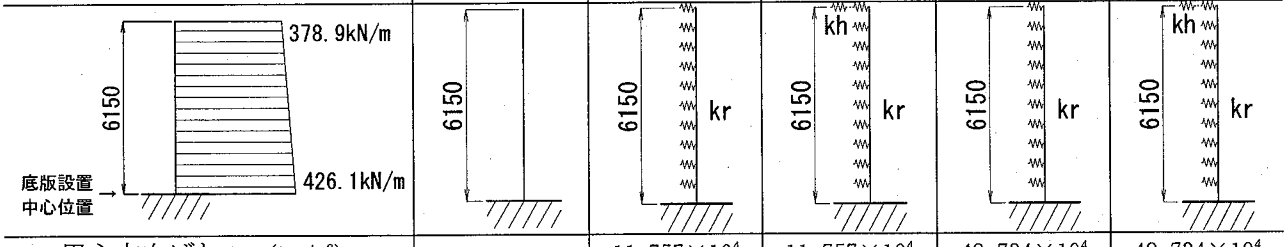
本研究で取り扱った二次元解析手法を**表-6**に示す.現行設計法を基本とするため,比較対象とする三次元解析ケースは,框が存在するCase2とCase3にした.

表-6 シールド開口発生後の坑口壁二次元解析手法一覧表　（梁長の単位：mm）

ケース番号	Case2, 3 共通	Case2		Case3	
解析手法	現行設計法	二次元 A 法	二次元 B 法	二次元 A 法	二次元 B 法



円心方向ばね:kr (kN/m²)	---	11.757×10⁴	11.757×10⁴	49.734×10⁴	49.734×10⁴
仮想十字梁ばね:kh (kN/m²)	---	---	4.669×10⁴	---	201.233×10⁴



円心方向ばね:kr (kN/m²)	---	11.757×10⁴	11.757×10⁴	49.734×10⁴	49.734×10⁴
仮想十字梁ばね:kh (kN/m²)	---	---	4.660×10⁴	---	201.224×10⁴

表-7　シールド開口発生後の坑口壁二次元解析結果と三次元基準値の比較

ケース番号		Case2（連壁+底版+框）				Case3（連壁+底版+框+本体側壁）			
着目位置		框設置位置中心 (kNm/m)	比率	底版設置位置中心 (kNm/m)	比率	框設置位置中心 (kNm/m)	比率	底版設置位置中心 (kNm/m)	比率
三次元基準値		220	1.0	-80	1.0	172	1.0	612	1.0
坑口壁二次元解析手法種別	現行設計法	1300	5.9	7463	93.3*	1300	7.6	7463	12.2
	二次元A法	1058	4.8	2190	27.4*	1270	7.4	5643	9.2
	二次元B法	990	4.5	2088	26.1*	1164	6.8	4044	6.6

（＊：三次元基準値との+/-逆転）

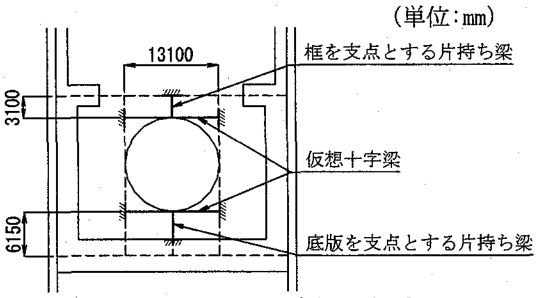


図-15　仮想十字梁の概念

表-6中の二次元A法は,表-4で示したように,シールド開口発生後も坑口壁には円周方向軸力が十分伝達するという結果を反映させ,一般部の壁を鉛直方向の単純梁でモデル化する場合に用いる円心方向ばね[5)6)7)]を当該片持ち梁に適用した手法である.

表-6中の二次元B法は,シールド開口発生後の坑口壁の面外変形を図-15で示した仮想十字梁の変形に置換し,その面外変形拘束効果を二次元A法で適用した円心方向ばねに準じた仮想十字梁ばねで反映させた手法である.

(3) 坑口壁二次元解析結果と三次元基準値の比較

5(2)で説明した3種類の二次元解析手法を用いて得られた鉛直方向曲げモーメントを表-7に示す．同表が示すように，いずれの解析手法においても三次元基準値を上回り，安全側の結果を導いていることがわかる.

また，各々の二次元解析結果と三次元基準値の比率から判断すると,二次元B法が最も三次元基準値に近く,框設置位置中心ではCase2で4.5, Case3で6.8程度，底版設置位置中心では，Case3で6.6程度となっている.

なお,Case2の底版設置位置中心では,曲げモーメントの正負が逆転し,単純な比較はできないが,当該箇所は通常，複鉄筋で設計されるため,数値的には安全側の諸元を導くことになる.

このような現象が発生した主な要因は,三次元解析では,①部材厚が大きく設置面も広い底版への応力再配分が考慮される,②底版設置位置の円周方向軸力は,土被りの小さい框設置位置の円周方向軸力よりも大きくなり,両者の拘束効果の相違が考慮される,のに対して,二次元解析ではそれらを考慮できないことにあると言うことができる.

(4) 考察

矩形，円形といった立坑の平面形状に関わらず，坑口壁の応力分布を立坑特有の三次元挙動を含めて正確に把握することは非常に困難である.

しかし,表-7が示すように，現行設計法から得られる数値と三次元基準値の乖離は非常に大きく，これらに基づいて太径鉄筋の使用やコンクリートの厚肉化を余儀なくされる現状は，構造物の健全度向上の観点からも好ましくない.

今後は，本研究で得られた数値解析的な知見を確かなものとするために，現場計測結果等に基づく円心方向ばね剛性や仮想十字梁ばね剛性の再評価や坑口壁の挙動把握等を行い，合理的な円形立坑設計手法の確立に役立てる必要があると考えられる.

6．結論

本研究から得られた知見を以下に記す.

①框と本体側壁には,シールド発進前後の坑口壁円周方向軸力の変動を低く抑える効果がある.

②框には，シールド発進前後の坑口壁鉛直方向曲げモーメントの変動を低く抑える効果がある.

③円周方向軸力の連壁と本体側壁の分担率は必ずしも断面剛性比に則らない.

④シールド発進前後の坑口壁鉛直方向曲げモーメントの変化量は,円周方向軸力レベルと比べて非常に小さく，坑口壁についても框築造位置上方の一般部同様,円周方向を主筋方向,鉛直方向を配力筋方向とみなせる可能性がある.

⑤坑口壁鉛直方向曲げモーメントの算定において，現行設計法で用いられている片持ち梁モデルに，本研究で提案した仮想十字梁ばねを考慮すれば,現行設計法による解析結果よりも合理的な結果を導くことができる.

謝辞:本研究を進めるにあたり，円形立坑特有の設計手法ならびに連壁築造過程の詳細について貴重な助言をいただいた東京地下鉄(株) 大石敬司氏，(株)復建エンジニヤリング 有賀貴志氏，また MARC を用いた地盤解析手法について詳細な助言をいただいたTATE コンサルタンツ(株) 杜世開博士に謝意を表する次第である.

参考文献

1) 新井泰,大石敬司,小西真治:三次元挙動を考慮した矩形立坑の二次元解析モデルに関する考察,トンネル工学論文集,Vol.14, pp.115-122,2004.11.

2)生山法裕,馬場良正:立坑の3次元的地盤挙動の研究,日本国土開発技術研究報告,No.12,pp.71-82,1992.12.

3)岩波基:施工時偏側圧が作用する大深度円形立坑の設計法に関する研究,早稲田大学博士論文,pp.64-156,2003.3.

4)堂々功:円形地中連続壁の実測挙動に基づく設計法の合理化に関する研究,広島大学博士論文,1998.3.

5)日本トンネル技術協会:地中送電用深部立坑，洞道の調査・設計・施工・計測指針,p.97,1982.3.

6) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説　開削トンネル, pp.173-178,2001.3.

7) 東京都第三建設事務所:立坑構造物設計基準（案）,p.13,2001.3.

8) 東京都第三建設事務所:神田川・環状七号線地下調節池（第二期）妙正寺川立坑修正設計報告書(2/5)仮設設計編(1),1996.3.

9)早大理工学総合研究センター:東京都心部の大深度地下利用の具体的提案・第一期建設ルートの選定と技術的課題, 早大理工学総合研究センタープロジェクト,大深度地下インフラに関する調査研究,1995.10.

10)日本トンネル技術協会:大深度地下利用技術調査小委員会報告書，2000.11.

11)地盤工学会:基礎の沈下予測と実際,p.181,2000.2.

12)廣木良司,谷村秀樹,砂田覚,管井太:道路・河川地下構造物の変遷と今後の展望,トンネルと地下,第34巻,12号,pp.26-28,2003.12.

13)福島啓一:わかいやすいトンネルの力学(6),トンネルと地下,第22巻,12号,p.67,1991.12.

14)E.K. De Moor: An Analysis of bored pile/diaphragm wall installation effects,Geotechnique,Vol.44,No.2, pp.341-347,1994.

15)C.W.W.Ng M.L.Lings B.Simpson & D.F.T.Nash: An approximate analysis of the three-dimensional effects of diaphragm wall installation, Geotechnique, Vol.45,No.3, pp.497-507,1995.

16)C.W.W.Ng & R.W.M.Yan: Three-dimensional modeling of a diaphragm wall construction sequence, Geotechnique,Vol.49,No.6,pp.825-834,1999.

17)宮川房夫,川口廣,水谷進,吉村和彦,粥川幸司:硬質地盤における泥水式シールド超近接施工の掘進過程を考慮した地盤変状解析，土木学会論文集,No.528, VI-29,pp.17-30,1995.12.

18)Gourvenec, S.M. and Powrie,W: Three-dimensional finite-element analysis of diaphragm wall installation, Geotechnique, vol. 49, No.6, pp.801-823 ,1999.

19)岩波基,小泉淳:大深度山留め壁の施工時側圧に関する研究,土木学会論文集,No.707, VI-55,pp.125-139,2002.6.

20)後藤貞雄:大容量LNG地下式貯槽の建設技術に関する研究,東京工業大学博士論文,pp.194-198,1997.3.