

沈埋函の海上施工時の函体変形について

The Study on Deformation of Immersed Tunnel Element during Production Works while afloat

木村秀雄¹⁾・小島一雄¹⁾・盛高裕生¹⁾

Hideo KIMURA, Ichio KOJIMA and Hiro MORITAKA

Deformation of the sandwich-structured immersed tunnel element during concrete placing works while afloat is smaller than that of conventional "steel shell tunnels" and it more easily controllable because of the following reasons;

- ①The stiffness of the steel shell body is large even before the concrete is placed because of the double steel hull.
- ②Concrete placing works can be programmed chamber by chamber (about 10m³ each) and thus the order of concrete casting of chambers can be scheduled as convenient.

A temperature change model was set forth for each member in tunnel element section, deformation during production works was estimated based on beam model on elastic foundation subjected to bending moments caused by self weight and temperature difference. This paper shows the comparison of history of relative deflection with simulation results in actual production works, series studies using above model and points of concern for concrete placing works.

Key Words : sandwich-structure, immersed tunnel, concrete placing works while afloat, deformation

1. はじめに

従来、沈埋トンネル工法では函体の製作方法により「鋼殻方式」と「コンクリート方式」の二つの名称が用いられてきた。いずれも函体の構造形式はRC構造であるが、コンクリートを海上で施工するか、陸上（ドライドック）で施工するかの違いによるもので、前者は円形小断面の沈埋函が殆どの米国で、後者は矩形大断面の沈埋函を建設する欧州で主流である。我国もかつて前者により矩形大断面の沈埋函を製作したこともあったが、閉空間での煩雑なコンクリート施工という過酷な作業環境が嫌われたこともあり、大井のドライドックの建設を契機に後者による製作が殆どとなった。

ところが近年、設計の合理性を追求して止水鋼板を合成構造部材化したオープンサンドイッチ構造の沈埋函¹⁾に始まり、自己充填性高流動コンクリート²⁾の普及と設計法の整備³⁾などサンドイッチ構造の開発と実用化が進むに伴い、新しい構造形式の沈埋函はその製作方法にも大きな変化をもたらした。サンドイッチ構造の沈埋函⁴⁾は配筋・型枠・支保工の全てを鋼殻で代替してコンクリート施工が非常に簡素化されたが、

①二重鋼殻構造のため鋼殻だけの状態でも函体の剛性が大きい

②コンクリート打設は隔室（約10m³）単位で設定でき、任意の隔室群に任意の順序で施工できるなどから海上施工にも適しており、「コンクリート方式」で不可欠なドライドックを手当てすることが困難な状況となっていることも相俟って、「鋼殻方式」が見直されている。

1) 正会員 新日本製鐵（株）鉄構海洋事業部

なお、沈埋函の新技术の普及に伴い、従来の名称である「鋼殻方式」と「コンクリート方式」は現在の沈埋トンネル工法を説明するには不適切で誤解を招きやすいものとなっている。そこで、従来の名称の廃止と表－１に示す分類とを提唱する。

さて、沈埋函の「陸上施工」では函端面の出来形を函体製作工の最後で調整できるが、「海上施工」では函体が海中にあることから函端面の出来形の調整が難しく、函体の施工中の変形や出来形の確保について何らかの対策が期待されていた。

沈埋函の海上施工時の変形では、コンクリートの自重によって生じる函断面内の鉛直方向の変形は、函体内空に設けた余裕代で十分に吸収できる程度であり特段の対策を必要としない。しかし、函体の弱軸方向となる函軸鉛直方向の変形は、必ずしも水圧接合に不具合が無ければよいという場合ばかりではなく、トンネルの沈下や耐震上の要請から施工継手部に可撓性継手を構築する場合は、函端面の出来形が沈下や地震時の継手の止水性能に影響を及ぼすので変形は最小限に押さえる必要がある。

したがって、対策としては函体の函軸鉛直方向の変形を小さくする順序でコンクリートを打設すればよいのであるが、変形量の推定方法に課題があった。「海上施工」で製作された川崎港海底トンネル工事では、製作中に実測された函軸方向のたわみは最大 70mm 程度であったが、弾性床上のほりにコンクリートの自重だけを外力としたモデルで推定した沈埋函の変形は、たわみ量ばかりか予測した推移の傾向までも現実とは符合しなかった。⁵⁾

筆者らはサンドイッチ構造沈埋函工法の開発⁶⁾の一環として函体の海上施工時の変形問題に取り組み、コンクリートの自重や函体の受ける浮力の他に、コンクリート硬化時の温度変化過程を荷重項として加えた簡便な推定法を考案してプログラム化し、沈埋函の海上施工時の最適なコンクリート打設順序についての検討を行ってきた。本論文はこの推定法を検証する機会となった実際の沈埋函製作工事での計測結果との比較から沈埋函の海上施工時の変形要因について考察し、施工計画に留意すべき点に言及したものである。

表－１ 沈埋函の構造形式と施工方法の組合せの適性

構造形式 施工方法	RC構造	合成構造	
		オープンサンドイッチ構造	サンドイッチ構造
陸上施工	適 (実証多数) (旧称：コンクリート方式)	適 (大坂湾・新衣師)	適 (神戸港島)
海上施工	かなり不適 (衣師・川崎) (旧称：鋼殻方式)	不適 (矩形断面の場合) 適 (円形断面：米国に実証多数)	適 (那珂)

２．洋上打設時の函体の変形モデル

(１) 構造モデル

函体が海水から受ける浮力を弾性床で表わした函軸方向のほりでモデル化する。なお、はりの曲げ剛性は、コンクリート打設直後は鋼殻だけの剛性を考えてコンクリートは荷重として扱うが、ある時間を経過した後は硬化したコンクリートと鋼とが合成した曲げ剛性を有するので、はりの曲げ剛性はコンクリートの打設工程に従い逐次更新する。

(２) 荷重モデル

荷重は、図－１に示すように鋼殻の自重 ($W①$) の他に、以下の３項目を考慮する。

i) コンクリートの自重 ($W②$)、以下「荷重効果」と略記する)

函体の打設区画毎にコンクリートの重量を鉛直下向きに作用させる。

ii) 付加曲げモーメント ($M①$)、以下「温度効果」と略記する)

打設したコンクリートの水和反応による発熱によって鋼殻とコンクリートに生じる熱膨張と熱収縮とが函体に与える付加曲げモーメントを次式で与える。

$$M_i = \sum (A_i \times E_i \times \alpha \times \Delta t_i \times h_i)$$

ここで、 M_i : 温度変化による付加曲げモーメント (N・m)

A_i : 断面積 (m²)

E_i : ヤング率 (N/m²)

α : 線膨張係数 (1/℃)

Δt_i : 温度変化量 (℃)

h_i : 函体中立軸からの偏心量 (m)

温度変化量は、コンクリートの練り上がり温度と断熱温度上昇量曲線、及び境界条件として大気温・函内温度・海水温の他、部材と外気間の熱伝達率と海水境界厚を仮定して、沈埋函の上・下床版、壁の各部材版厚方向の1次元熱伝導解析を行い温度履歴を推定して温度モデルとして与える。なお、変形推定モデルを簡易にする目的で温度モデルは解析ステップである日単位の階段関数に単純化する。

iii) 函体端部に発生する喫水分のモーメント (M②)

コンクリート打設の進捗に伴い函体の喫水が変化する。この喫水毎に函体に作用する水圧と函体の中立軸からの偏心量から得られる曲げモーメントを函体端部に作用させる。

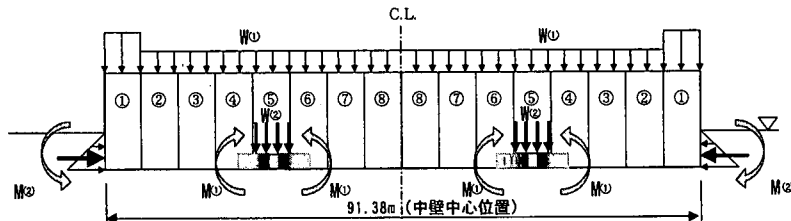


図-1 函体に作用する荷重

3. 実施工での検証

(1) 那覇港トンネル沈埋函製作工事

那覇港トンネルは那覇ふ頭地区の湾口部を横断し那覇空港と波の上地区とを結ぶ海底トンネルであり、空港側立坑と三重城側立坑間 724m の沈埋トンネル区間は8函の沈埋函で構成される。沈埋函製作工事は本土で製作した鋼殻を半潜水式台船に搭載して沖縄まで輸送し、台船に注水して鋼殻を進水し、岸壁に係留してサンドイッチ構造の沈埋函を「海上施工」で製作するものである。コンクリート工事は週4日の打設ペースで2ヶ月弱連続して総量 10,260m³ の自己充填性高流動コンクリートを施工して沈埋函を完成させた。

高流動コンクリートの施工は函軸方向に函中央から左右対称に各8ブロックの打設区分に分け、自重によって函体に発生する曲げモーメントが最小となる順序で打設した。函断面内は図-2に示すように、側道下、壁部から打設を開始し、その後も函軸方向の順序は同じにして下床版、上床版の順で打設した。

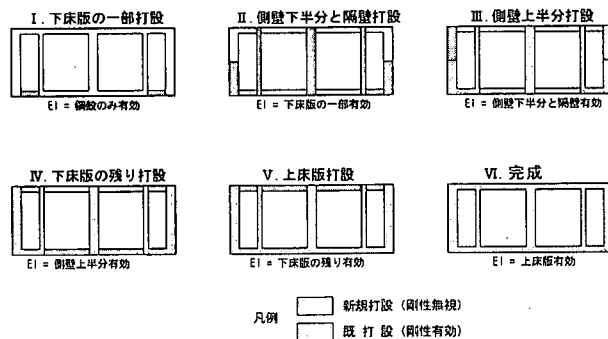


図-2 コンクリートの函断面内打設順序

計測はトータルステーションによる3次元測量によって、日照による変形の影響の無い深夜に函体内外に設けられた200点余の計測点を測量した。計測回数は施工期間中19回に及び、3次元測量結果から施工中の函体の変形状況をモニターしながら変形シミュレーション結果と対比して不測の変形が生じていないかを確認しつつ慎重に施工された。コンクリートの打設工程と計測工程を表-2に示す。

表-2 打設工程と計測工程

打設量

表 2 打設工程の計測工程

11月

経過日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
断面Ⅰ	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木
断面Ⅱ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
断面Ⅲ					⑥	②				⑧		④	⑤	①				⑦	③													
断面Ⅳ																							⑥②	④④			③①	②③				
断面Ⅴ																													⑥			
打設量(m³)	202	202			315	315				315		315	315	315				315	315			280	280				280	280		379		
計測No.		△				△					△			△						△							△					

12月

経過日数	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	
断面Ⅰ	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	
断面Ⅱ	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	
断面Ⅲ																											
断面Ⅳ	②				⑧	④		⑤	①			⑦	③														
断面Ⅴ																⑥	②			⑧	④		⑤	①		⑦	③
打設量(m³)	379				379	379		379	379			379	379			419	419			419	419		419	419		419	419
計測No.	△					△			△				△			△				△			△			△	

打設量

(2) 構造モデル

コンクリートの各打設工程における函体の函軸方向の曲げ剛性を表-3に示す。なお、施工したコンクリートの初期材齢供試体から静弾性係数を計測し、図-3に示すような階段関数でコンクリートの静弾性係数が発現するモデルとした。

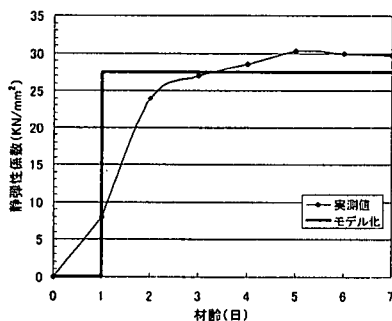
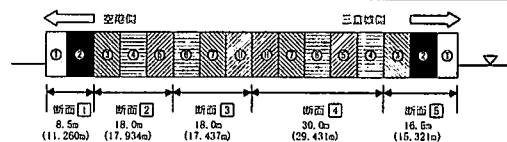


図-3 コンクリートの静弾性係数

表-3 函体の曲げ剛性

	断面形状 (掘削部：合成構造)	曲げ剛性 (EI: kNm²)				
		断面Ⅰ	断面Ⅱ	断面Ⅲ	断面Ⅳ	断面Ⅴ
I 鋼梁のみ有効		5.259E+09	5.558E+09	6.537E+09	5.513E+09	7.357E+09
II 下床版の一部有効		6.393E+09	6.915E+09	8.069E+09	6.073E+09	9.090E+09
III 側壁下半分と床版有効		1.039E+10	1.080E+10	1.208E+10	1.006E+10	1.316E+10
IV 側壁上半分有効		1.313E+10	1.345E+10	1.452E+10	1.344E+10	1.547E+10
V 下床版の残り有効		1.997E+10	2.051E+10	2.216E+10	2.066E+10	2.358E+10
VI 上床版有効		4.128E+10	4.154E+10	4.255E+10	4.150E+10	4.345E+10



(3) 荷重モデル

温度変化量モデルの作成に当っては、打設するコンクリートの断熱温度上昇量を実測し、施工期間中コンクリートの練り上り温度・海水温・函内温度・海水温が大きく変化しないとして、実測されたそれらの平均

的な値を用いた。なお、海水の熱境界層厚は潮流速を考慮して乱流熱伝達状態が支配的であると考へ、その層厚を5mmと仮定した。

空気との熱伝達率の値は、施工に先立って行われた充填施工性確認試験の際に供試体に埋め込んだ熱電対により温度変化を計測し、図-4に示すように供試体の3次元熱伝導解析結果と実測値とを比較して、

$\alpha = 1.194 \times 10^{-3} \text{ (J/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C)}$ とした。なお、この値は自然対流での熱伝達率に相当する。

上記の条件で上・下床版、及び壁部材の版厚方向の1次元熱伝導解析を行い、図-5に示すように各部材の温度変化の時刻歴を求め、単純化した温度変化モデルを作成し、コンクリートの打設工程に従って前述の付加曲げモーメントとして荷重項に加えて函体の変形シミュレーションを行った。

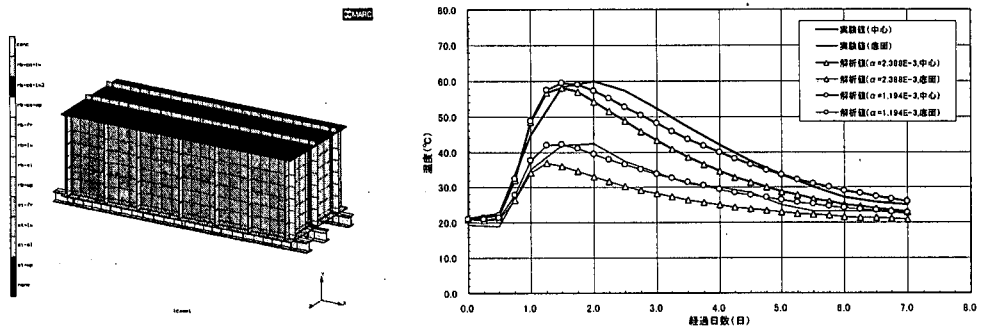


図-4 充填施工性確認実験の3次元熱伝導解析

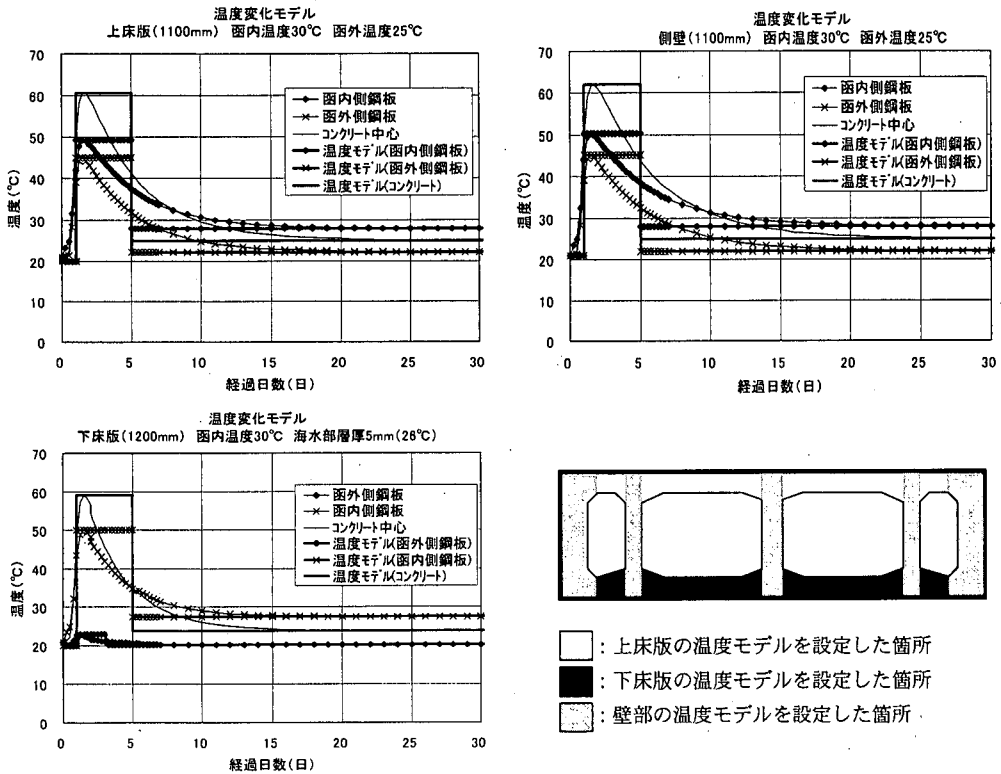


図-5 沈埋函部材の温度変化モデル

(4) 計測結果との比較

図-6 に3次元測量から得られた函軸方向の相対たわみ量の履歴とシミュレーションとの比較を示す。長さ約90mの沈埋函は20mm程度の僅かなたわみの変化を示した。シミュレーション結果は精度に課題を残しているものの、数値とそのたわみ変化の推移傾向は概ね現象を再現しており、施工検討程度の使用に耐え得るレベルである。

なお、この程度のたわみによる函端面の倒れは数mm程度の微小な値であり、函の水圧接合に支障は全く無かった。本トンネルの施工継手は全て剛結されるが、これはたとい施工継手を可撓性継手とした場合でも地震時の止水性能に対する影響は問題にならない程度であり、「海上施工」ゆえの沈埋函の出来形に対する懸念は不要であった。

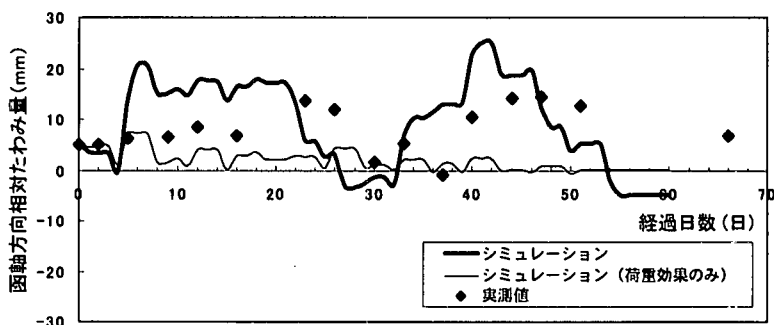


図-6 たわみ量の実測値とシミュレーションとの比較

4. 函体の変形要因について

実工事での検証から、沈埋函の「海上施工」における函軸方向のたわみ量の変化は本論文で示した簡易な推定法により概ね現象を説明できた。そこで、この推定法を用いて海上施工時の変形要因について考察を加え、施工計画に留意すべき点に言及する。

(1) 変形に対する荷重効果と温度効果の影響度

前述の通り、本推定法においては荷重モデルとして、

- ①鋼殻とコンクリートの自重（「荷重効果」）
- ②打設したコンクリートの水和反応による発熱によって鋼殻とコンクリートに生じる熱膨張と熱収縮とが函体に与える付加曲げモーメント（「温度効果」）
- ③喫水分の函体端部に発生するモーメント

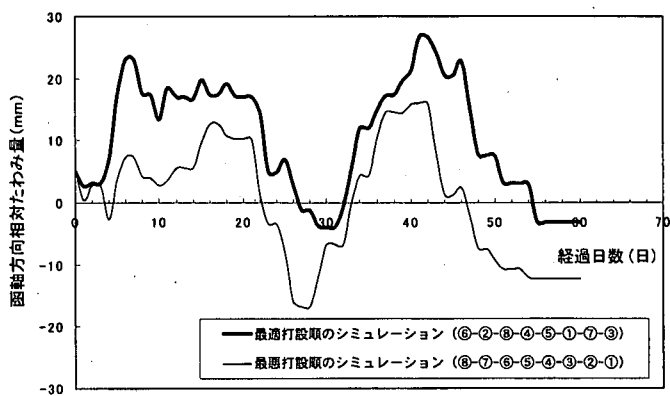
を考慮している。この内、他に比べ僅少な③を除き、①と②の影響度について考察する目的で「荷重効果」のみを考慮したシミュレーションを行い、実施工での計測値、及び両者を考慮したシミュレーションと併せて図-6の中に細実線で示す。

この細実線と太実線の差は「温度効果」による分であり、これがかなり大きい。すなわち函体の変形には「温度効果」が支配的であると言える。したがって、温度変化モデルを更に忠実に再現すれば、変形推定精度を向上させることは可能であろう。

(2) 函軸方向のコンクリート打設順に関する検討

変形推定モデルによる解析を実施することにより適切な打設順序を抽出することが可能である。まず、函軸方向の打設順の違いが函体の変形量にどの程度影響を及ぼすのかを検討した。図-7に函体の最終たわみ

量が函体完成時に最小となる打設順（最適打設順）と最大となる打設順（最悪打設順）での変形履歴を示す。断面内の打設順序は那覇港トンネル沈埋函製作工事での打設順と同様であり、これを各断面内の打設段階毎に繰返している。この解析結果から函軸方向の打設順は施工中の変形量そのものにはさほど大きな相違を与えないと考えられる。

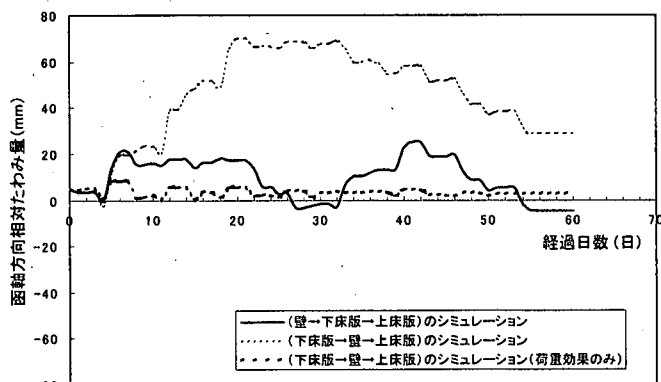


図－7 函軸方向の打設順に対するたわみ量（壁部先行打設時）

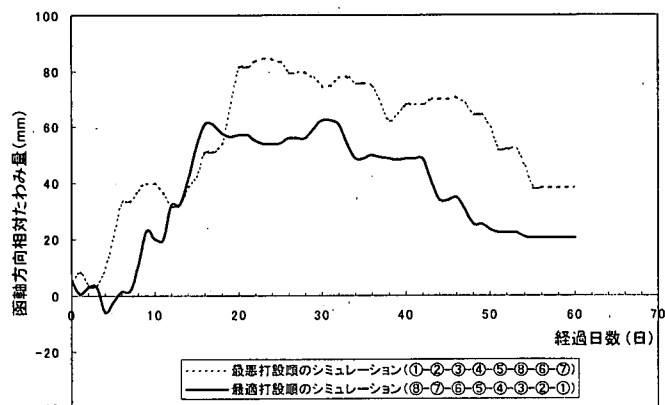
（３）断面内のコンクリート打設順に関する検討

施工の初期段階で沈埋函の函軸方向の剛性を大きくすれば変形抑制に効果が期待できる。これを定量評価すべく、壁部を先行打設した実工事での断面内打設順での変形推定結果と、従来の「鋼殻方式」での施工順である下床版を先行する断面内打設順での変形推定結果とを比較して図－８に示す。後者は下床版の打設中から断面内の変形が大きくなり、同じ函軸方向の打設順であっても前者の４倍程度まで変位が大きくなる結果となった。壁の先行打設の変形抑制効果は明らかであり、これが容易なサンドイッチ構造の沈埋函は「海上施工」に適した沈埋函の構造形式と言えよう。

なお、この場合でも変形に対する「荷重効果」と「温度効果」との影響度は、同図からも明らかに「温度効果」の方が大きいことが分る。また、図－９にこの場合の最適打設順と最悪打設順での変形履歴を示すが、壁の先行打設の場合と同様に函軸方向の打設順序の違いによる差は明瞭でない。



図－８ 函断面内の打設順に対するたわみ量の比較



図－９ 函軸方向の打設順に対するたわみ量の比較
（下床版先行打設時）

5. 結論

大都市臨海部において沈埋函製作用のドライドックの手当てが困難な状況下、沈埋函の「海上施工」が再評価されている。コンクリート施工が簡素化されたサンドイッチ構造の沈埋函は「海上施工」の場合でも、10m³程度の隔室からなるコンクリートの打設単位を組み合わせることで変形を抑制する施工計画に容易に対応できるが、函軸鉛直方向の変形要因とこれを抑制する効果的な施工計画に関する知見は必ずしも十分でなかった。

そこで、筆者らは函体の簡便な変形モデルを考案し、これによる変形推定と実施工での計測値との比較を行って比較的良好な結果を得た。また、この変形モデルを用いた沈埋函の「海上施工」時の変形要因について検討を行い、以下の結論を得た。

- ①函軸鉛直方向の変形は、鋼殻やコンクリートの自重の他にコンクリート硬化時の発熱による温度上昇・降下による温度モーメントを考慮し、温度変化中の断面剛性の変化によって変形として累積されるとする変形モデルで実用的に再現することが可能である。
- ②函軸鉛直方向の変形には「温度効果」が支配的であり、温度変化モデルを忠実に再現すれば、より精度の高い変形予測が可能となろう。
- ③この変形モデルによって膨大なケース数のコンクリート打設工程から適切な打設順序を抽出することができる。
- ④変形に対する影響が大きいと考えられていた函軸方向の打設順の違いは、必ずしも函軸鉛直方向の変形量に大きな影響を及ぼさない。
- ⑤むしろ、函軸鉛直方向の変形量に大きな影響を及ぼすのは函断面内の打設順序であり、従来の「鋼殻方式」のように下床版を先に施工すると変形量はかなり大きくなる。これに対して、壁部を先行して打設すると施行の初期段階から効果的に函軸方向の剛性を大きくして変形抑制に有効である。
- ⑥上記が容易なサンドイッチ構造の沈埋函は「海上施工」に適した沈埋函の構造形式といえる。
- ⑦なお、実施工における函体の出来形はドライドックでの「陸上施工」による出来形に遜色なく、水圧接合はもとより施工継手に可撓性継手を構築する場合でも十分な出来形であることも確認された。

謝辞

那覇港（那覇ふ頭地区）道路（空港線）沈埋函製作工事の発注者である内閣府沖縄開発庁那覇港湾空港工事事務所、及び同事務所三重城出張所の関係各位、並びに種々のデータの提供を頂いた五洋建設・新日本製鐵・三井不動産建設特定建設工事共同企業体工事事務所の各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 運輸省第三港湾建設局大阪港湾空港事務所、大阪市港湾局：大阪港咲洲トンネル工事誌、1998.3
- 2) 小門 武、三宅正人：スラグ系締固め不要コンクリートの基礎特性と充填性実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.1, pp.875 - 880, 1991
- 3) (社)土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案）、コンクリートライブラリー73, 1992
- 4) 神戸市港湾整備局、運輸省第三港湾建設局：神戸港港島トンネル工事誌、1999
- 5) (社)日本港湾協会：川崎港海底トンネル工事誌、1981.4
- 6) 木村秀雄、小島一雄、盛高裕生：サンドイッチ構造沈埋函工法の開発、新日鉄技報 No.376 pp.79 - 85, 2002