

(11) 合成版式沈埋函のコンクリート海上浮遊打設による変形解析

Deformation Analysis of Composite type Immersed Tunnel at Mooring during Concrete Casting

花城 盛三*, 喜多 和博**, 清宮 理***, 北澤 壮介****, ○荒木 英二*****, 久保田 真*****
Seizo Hanashiro, Kazuhiro Kita, Osamu Kiyomiya, Sosuke Kitazawa, Eiji Araki, Makoto Kubota

- * 沖縄総合事務局 那覇港湾空港工事事務所 (〒900-0001 那覇市港町 2-6-11)
- ** 沖縄総合事務局 那覇港湾空港工事事務所 三重城出張所 (〒900-0036 那覇市西 3-20-1)
- *** 工博, 早稲田大学教授, 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
- **** 工修, (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-16)
- ***** (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-16)
- ***** 日本シビックコンサルタント株式会社 技術本部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里 2-26-2)

Filled concrete is cast into sandwich member of immersed tunnel which is moored at front of pier. Prediction of deformation of the elements during concrete casting is important to joint work between elements. Accuracy of element edge effects on size of rubber gasket and modification of snake configuration of tunnel axis. Two dimensional model and three dimensional model by finite element method considered location order of concrete casting and thermal stress by heat of hydration are adopted to calculate the deformation of the elements. Deformation of the element edge is calculated within 10mm and optimum casting order is determined by these simulation analysis.

Key Words : Composite type , Immersed Tunnel, Mooring during Concrete Casting, Deformation of the element edge

1. はじめに

沈埋函構造形式はRC構造、鋼殻構造、鋼コンクリート合成構造があるが、鋼コンクリート合成構造の建設事例が増加している。函体製作はドック製作が主流であるが、沖縄では製作ドックの確保が困難なことから鋼殻を別の場所で製作しコンクリートを海上浮遊打設する方法が採用された。

鋼コンクリート合成構造沈埋函の海上浮遊打設製作は初めてであり、水圧接合時の継手部端面精度の確保と端面変形の予測及び施工管理が課題となった。

本報告は、川崎港沈埋トンネルの施工事例を基に解析手法の妥当性確認を行い、^{5), 6)} 那覇港臨港道路空港線沈埋トンネル第1号函体を対象とした二次元モデルおよび三次元モデルによる有限要素法で変形解析を行い最適打設手順及び継手部端面変位について検討したものである。

2. 那覇港臨港道路空港線沈埋トンネル計画概要

本トンネルは昭和63年2月に行われた那覇港港湾計画における臨港交通施設の一環として、那覇港と那覇空港、本島南部間とのアクセスを強化し、今後増大する港湾貨物等の円滑な交通処理を図るために計画された臨港

道路である。トンネル諸元を以下に示す。

- ・道路規格：第3種1級
- ・設計速度：80km/h
- ・車線数：片側3車線、往復分離6車線
- ・トンネル断面：36.9m×8.7m (幅×高さ)
- ・函割：8函 (92m×2函+90m×6函)
- ・構造形式：鋼コンクリート合成構造フルバットイッチ形式
- ・函体製作方法：コンクリート海上浮遊打設方法
- ・換気方式：立坑集中排気縦流方式

3. 二次元梁モデル

3.1 目的

沈埋トンネルは止水構造、耐震性能、水圧接合等の面から函体継手の端面精度確保が不可欠である。

コンクリート海上浮遊打設工法の場合、函体製作後の端面調整は困難なため、函体変形を事前に予測し、端面変位を小さく抑えることが重要となる。

このため、二次元梁モデル解析では端面変位・発生曲げモーメント力を小さく抑えるためのコンクリート打設手順を求める事を目的とした。

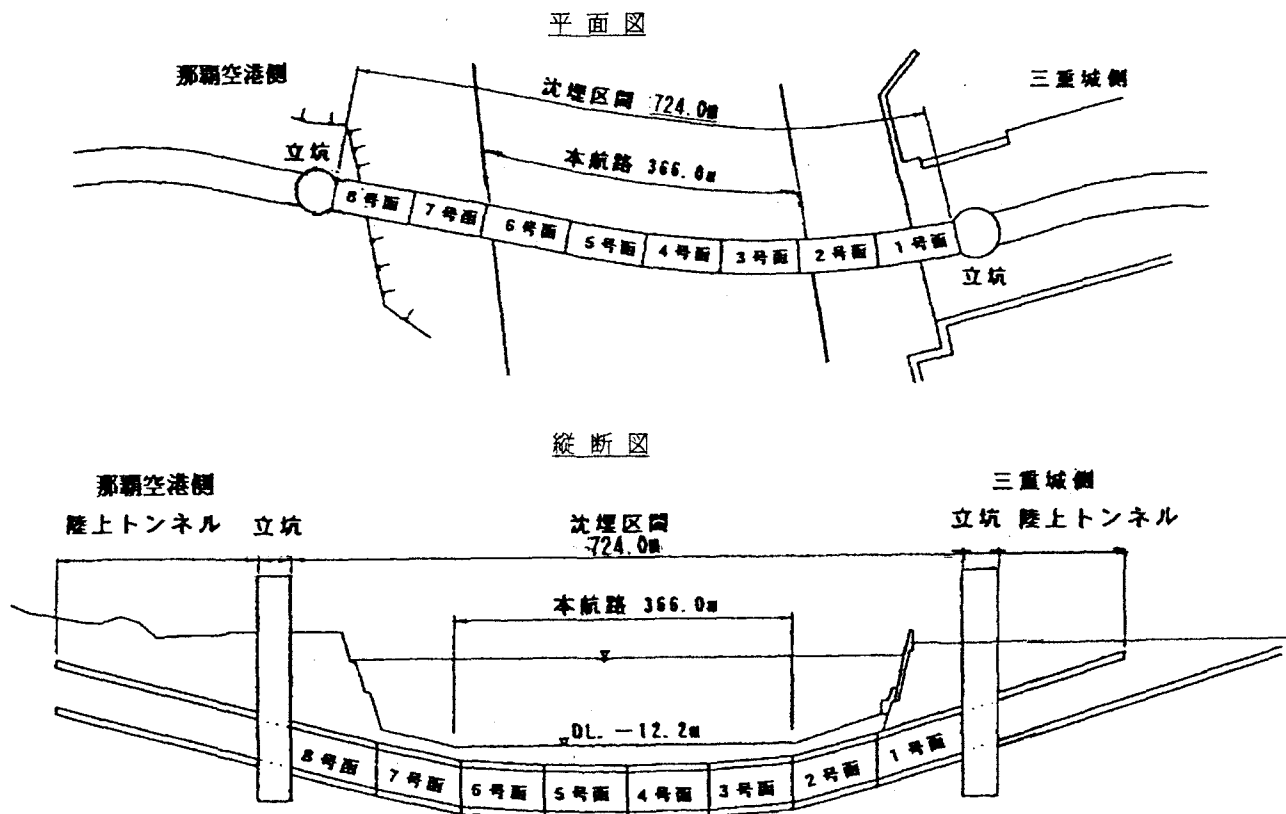


図-1 全体位置図

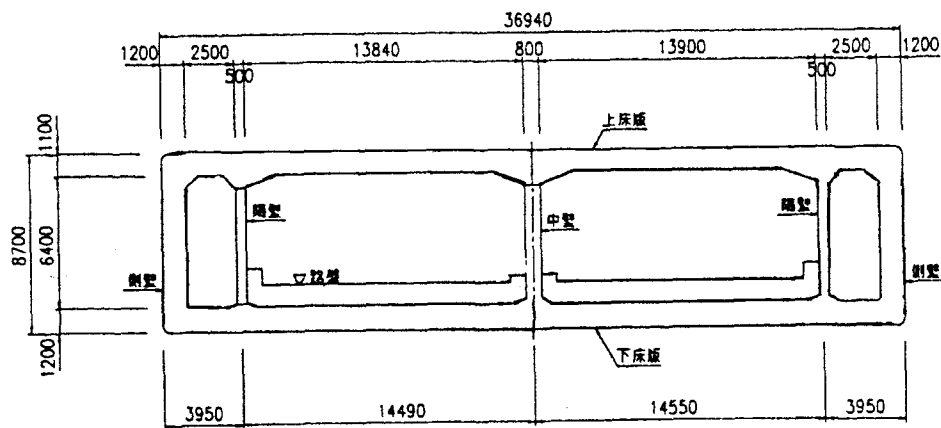


図-2 沈埋函断面図

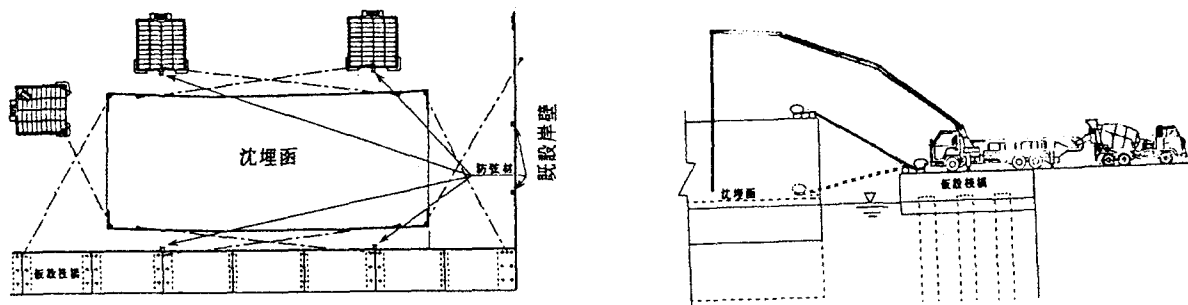


図-3 沈埋函係留状況及びコンクリート海上浮遊打設状況概要図

3.2 解析方法

二次元解析は、浮力を弾性ばねで評価した梁モデルを用い、函軸方向コンクリート打設手順をパラメータに端面変位・発生曲げモーメント力を計算した。

1) 解析モデル

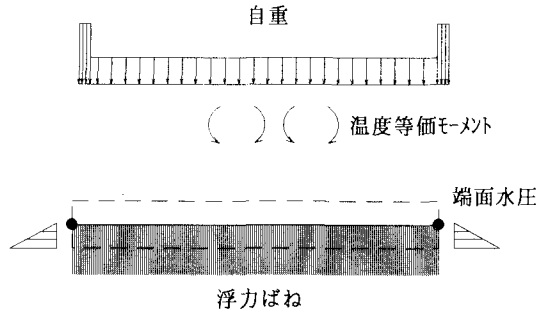


図-4 解析モデル

2) 設計フロー

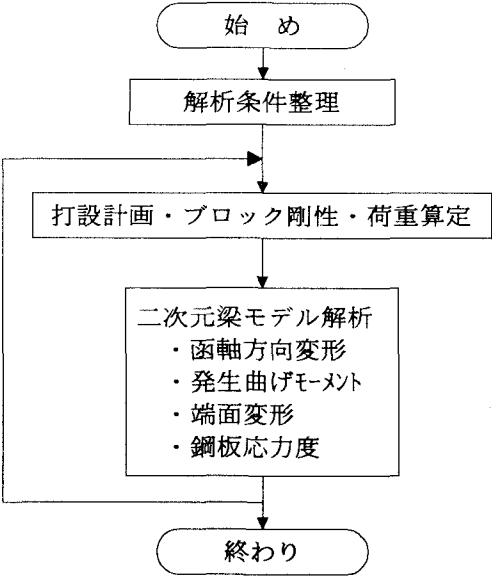


図-5 設計フロー

3) コンクリート打設条件

- ・コンクリート打設量は 300m³/日とする。
- ・函体横断面方向は、函軸方向初期剛性を高める目的で、5分割をⅠ～Ⅴの手順で打設する。
- ・函軸方向は左右対称の16分割(①～⑧)とし、打設手順は8！＝4万ケースを解析パラメータとした。

4) 断面剛性

- ・沈埋函の剛性は打設工程に従い6タイプとした。
- ・コンクリート剛性は簡略化し、3日強度発現とした。

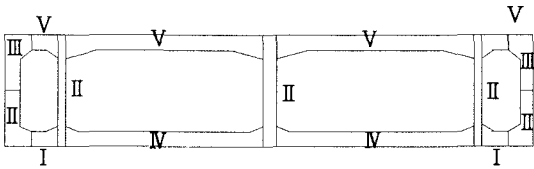


図-6 横断面打設手順

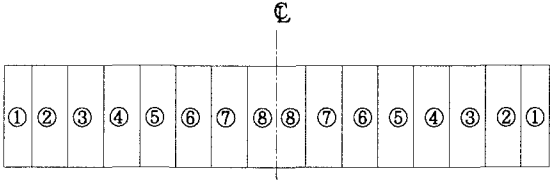


図-7 函軸方向ブロック分割

表-1 コンクリート打設工程と函軸ブロック打設状況

打設日	部 位	分割番号	最終完了	打設日	部 位	分割番号	最終完了
1	下床Ⅰ	⑥②⑧④	10日	50	下床Ⅳ	⑥	53日
3	"	⑥②⑧④	12日	52	"	②	61日
19	側壁Ⅱ	⑥	24日	54	"	⑧	63日
22	"	②	27日	57	"	④	66日
24	"	⑧	29日	59	"	⑤	68日
26	"	④	31日	61	"	①	70日
29	"	⑤	34日	64	"	⑦	73日
31	"	①	36日	66	"	③	75日
33	"	⑦	38日	71	上床Ⅴ	⑥	76日
36	"	③	41日	73	"	②	78日
38	側壁Ⅲ	⑥②	43日	75	"	⑧	80日
40	"	⑥④	45日	78	"	④	83日
43	"	⑥①	48日	80	"	⑤	85日
45	"	⑥③	50日	82	"	①	87日
				85	"	⑦	90日
				87	"	③	92日

注：本工程は打設手順⑥②⑧④⑤①⑦③の例を示す。

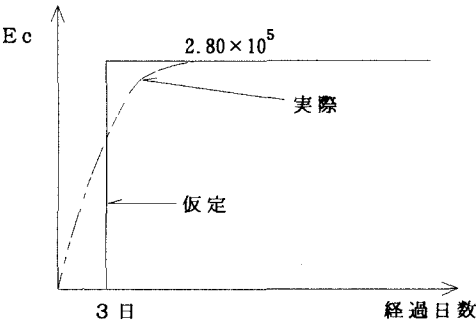


図-8 コンクリート強度発現曲線²⁾

5) 荷重条件

- ・荷重条件は①自重、②端面水圧、③温度荷重（コンクリート硬化熱）とした。
- ・水圧は端部負荷モーメント力として作用させ、温度応力は温度等価モーメント力を作用させた。

表-2 材料特性^{1),2)}

	鋼 材	高流動コンクリート
材 質	SM490YA	$f'_{ck}=300\text{kgf/cm}^2$
弾性係数 (kgf/cm^2)	2.1×10^6	0×10^5 (0~2 日) 2.8×10^5 (3 日以降)
ポアソン比	0.3	0.2
単体重 (tf/m^3)	7.85	2.3
熱膨張係数 ($/^\circ\text{C}$)	10×10^{-6}	10×10^{-6}

3.3 解析結果

浮遊打設解析結果より、打設手順の違いにより函体軸方向変形状は凹型から凸型と変化し、残留端面変位は -1.4mm から $+3.3\text{mm}$ の範囲に分布することが分かった。

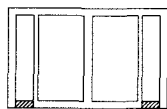
端面変位最小となる打設順序は③-⑤-⑦-④-⑧-⑥-②-①となり、発生モーメント最小となる打設順序は⑥-②-⑧-④-⑤-①-⑦-③となった。

両者の残留端面変位には殆ど差がなく、鋼殻最大発生応力で優位性のある発生モーメント最小となる打設順序⑥-②-⑧-④-⑤-①-⑦-③が最適であると判断した。この結果に基づき、3次元FEM解析により詳細な残留端面変位検討を行うこととした。

表-3 二次元梁解析による浮遊打設結果

	打設順序	残留端面変位(mm)	たわみ(mm)	備 考
端面変位最小	③⑤⑦④ ⑧⑥②①	0.0	-1.2	$M=-12519\text{tfm}$ $\sigma_s=-141\text{kgf/cm}^2$
端面変位最大 凹型	⑧⑦⑥⑤ ④③②①	-1.4	-5.3	
端面変位最大 凸型	①②③④ ⑤⑥⑦⑧	3.3	9.5	
モーメント力 最小	⑥②⑧④ ⑤①⑦③	0.8	1.5	$M=-5434\text{tfm}$ $\sigma_s=62\text{kgf/cm}^2$

1. 下床版の一部打設



$EI = \text{鋼殻のみ有効}$
 $EI = 0.639 \times 10^9 \text{tf} \cdot \text{m}^2$
 $Z = 6.44\text{m}^3$

2. 側壁下半分と隔壁打設



$EI = \text{下床版の一部有効}$
 $EI = 0.755 \times 10^9 \text{tf} \cdot \text{m}^2$
 $Z = 6.44\text{m}^3$

3. 側壁上半分打設



$EI = \text{側壁下半分と隔壁有効}$
 $EI = 1.19 \times 10^9 \text{tf} \cdot \text{m}^2$
 $Z = 10.54\text{m}^3$

4. 下床版の残り打設



$EI = \text{側壁上半分有効}$
 $EI = 1.55 \times 10^9 \text{tf} \cdot \text{m}^2$
 $Z = 15.63\text{m}^3$

5. 上床版打設



$EI = \text{下床版の残り有効}$
 $EI = 2.25 \times 10^9 \text{tf} \cdot \text{m}^2$
 $Z = 18.08\text{m}^3$



$EI = \text{上床版有効}$
 $EI = 4.31 \times 10^9 \text{tf} \cdot \text{m}^2$
 $Z = 45.82\text{m}^3$

図-9 断面剛性

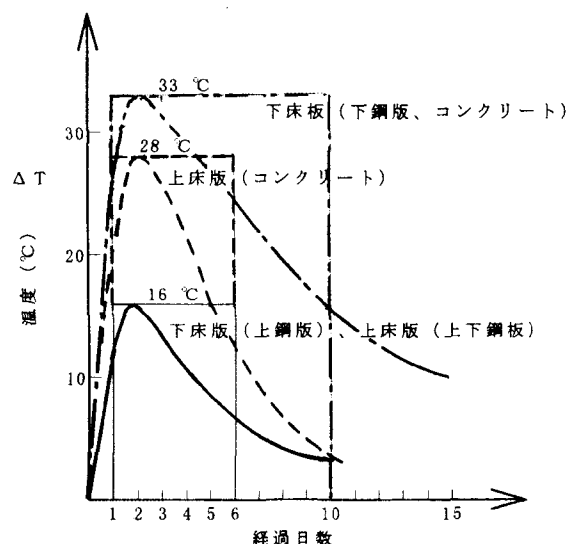


図-10 熱伝導解析結果

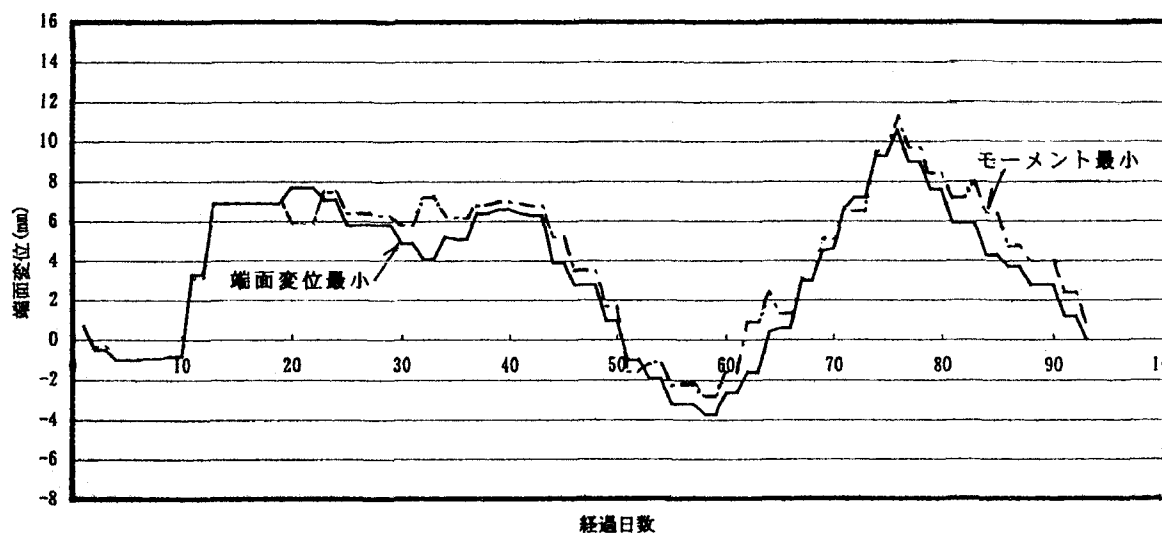


図-11 残留端面変位と経過日数の関係

4. 三次元FEM解析

4.1 目的

沈埋トンネルとして最も重要な止水性確保のため継手部端面変位の詳細予測及び部材別あるいは局部的発生応力度について照査する目的で3次元FEM解析を行う。解析はMARC(Ver7.2)を使用した。

4.2 解析方法

三次元FEM解析では鋼殻構成主部材、コンクリート部材、バルクヘッドをモデル化し、二次元梁モデル解析によって求められた打設順序に従い、端面変位・局部変位・発生応力度について詳細な検討^{3),4)}を行った。

1)解析モデル

沈埋函のモデル化は、次の条件を前提とする。

- ・1/2 対象モデルとする。
- ・解析モデル切断面は対象境界条件で拘束する。浮力ばねは鉛直方向のみ拘束する。
- ・鋼殻構成部材を板要素、コンクリート部材を立体要素、バルクヘッドの主桁を梁要素で表現する。また、鋼とコンクリートはリブ等により一体化されているものとする。
- ・鋼殻は内外鋼板、フルウェブ、ダイヤフラム、端部鋼殻を考慮する。

2)コンクリート打設条件

コンクリート打設条件は二次元解析と同様とする。打設手順はモーメント最小である⑥-②-⑧-④-⑤-①-⑦-③とし、コンクリート打設工程と函軸ブロック打設状況は表-1と同様とした。

3)部材定数

材料特性は二次元解析と同様とする。ただし、コンクリートの弾性係数は材齢日ごとの値を用いた。

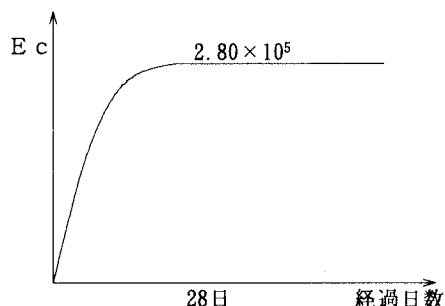


図-12 コンクリート強度発現曲線

4)荷重条件

- ・荷重条件は①自重、②端面水圧、③温度荷重（日射熱 20℃、コンクリート硬化熱は二次元解析と同様とする）とした。
- ・水圧は端部負荷モーメント力として作用させ、温度応力は温度等価モーメント力を作用させた。

4.3 解析結果

図-14 の日射無し of 三次元解析結果と図-11 の二次元解析結果を比較すると、コンクリート打設ステップ毎の函体端面変形状は同様の傾向を示しており、残留端面変位量としては約4倍程度の値を示している。

図-15 は日射を考慮した場合の立坑継手側残留端面変位と経過日数の関係を示しており、端部鋼殻ガスケッ トビーム前面に生ずる残留端面変位は中壁部で 10.61mm、側壁部で 4.64mm を示している。また、函体継手側残留端面変位は中壁部で 9.29mm、側壁部で 5.95mm である。

表-4 三次元解析による残留端面変位

		日射無し(mm)	日射考慮(mm)
立坑継手側 端部鋼殻	側壁	3.58	4.64
	中壁	-1.69	10.61
函体継手側 端部鋼殻	側壁	2.15	5.95
	中壁	-0.86	9.29

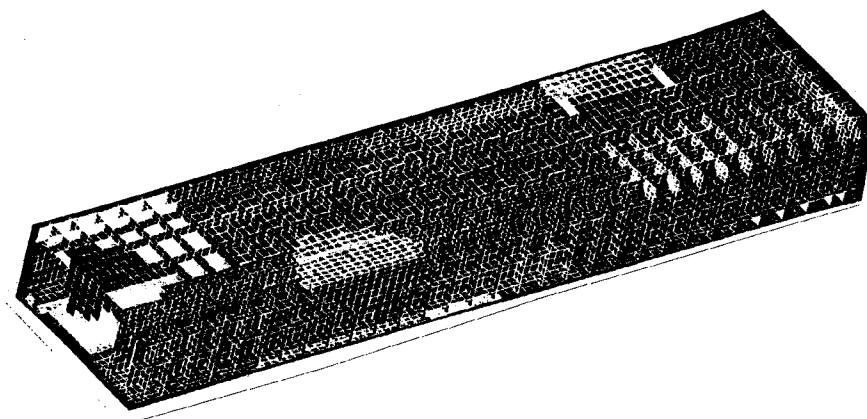


図-13 三次元FEM解析モデル

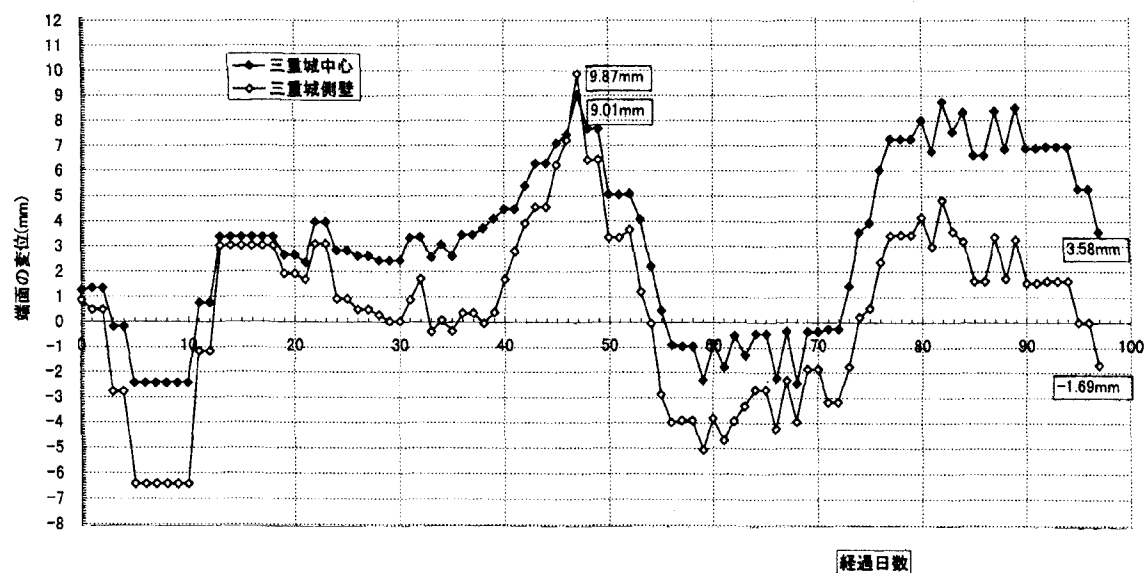


図-14 日射を考慮しない場合の立坑継手側残留端面変形と経過日数の関係

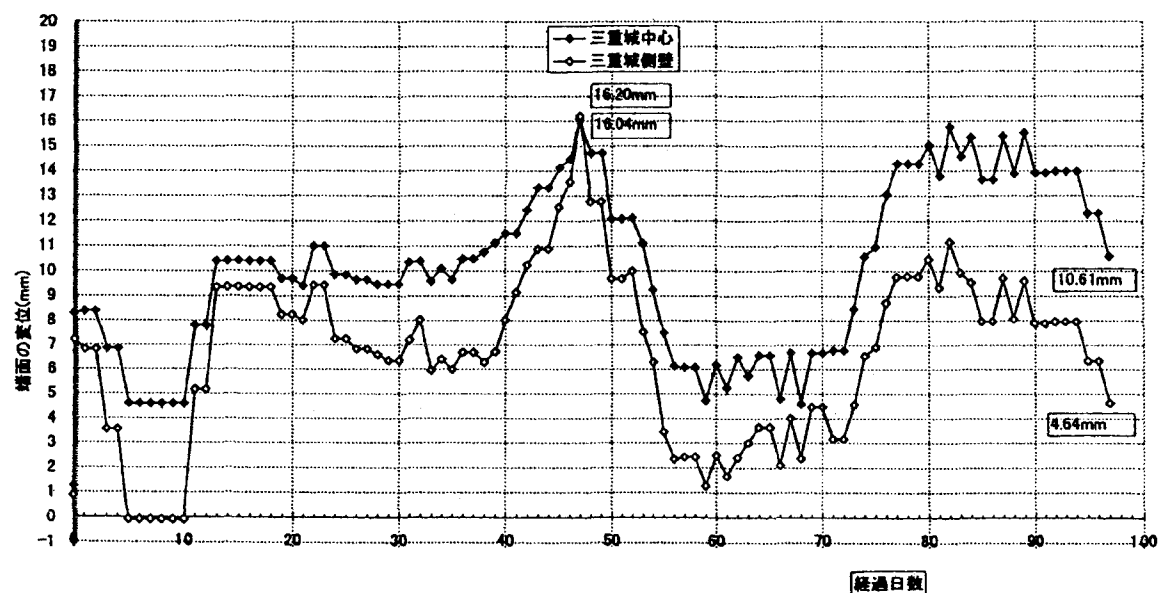


図-15 日射を考慮した場合の立坑継手側残留端面変形と経過日数の関係

5. まとめ

コンクリート海上浮遊打設による残留端面変位は3次元FEM解析によると日射を考慮した場合、最大で 10.61mm となるが、水圧接合時の一次止水ゴムガスケットは通常の 190-200-40 で対応できることが確認された。

今後増えるであろう鋼コンクリート合成構造物のコンクリート海上浮遊打設工法検討にあたり、今回考案した温度応力を評価した2次元骨組解析手法及び3次元FEM解析手法が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準同解説 (社) 日本港湾協会、pp232~264、1989.6
- 2) コンクリート標準示方書 (設計編) (社) 土木学会、pp13~15、1996
- 3) 鋼コンクリートサトイッチ構造設計指針(案) (社) 土木学会、pp4~47、1996.11
- 4) 沈埋トンネル技術マニュアル (財) 沿岸開発技術センター、pp28~54、1994.4
- 5) 清宮理、藤澤孝夫：川崎港海底トンネルでの施工時から完成時までの函体のひずみの長期測定、港湾技研資料、No. 352, 41p, 1980.6
- 6) 運輸省第二港湾建設局：川崎港海底トンネル工事誌、pp1121~1130、1981.4