

沈埋トンネルにおけるキーエレメント函 (最終函) 沈設・接合について

吉平健治¹・宮城三木夫¹

¹那覇港湾・空港整備事務所 第三工事課 (〒901-2100 沖縄県浦添市西洲1-1)

那覇港臨港道路空港線沈埋トンネル部において、従来必要とされていた最終継手工を省略する新工法「キーエレメント工法」を世界で初めて採用した。今回、世界で2例目となる最終沈埋函7号函の沈設・接合が完了したことに伴い、工事及び新工法の内容を報告するものである。

キーワード 那覇港臨港道路空港線、沈埋トンネル、キーエレメント工法、伸縮性止水ゴム

1.はじめに

那覇港臨港道路空港線は、那覇港（那覇ふ頭、泊ふ頭、新港ふ頭、浦添ふ頭）と那覇空港及び本島南部地域の輸送体系の強化並びに那覇市街地を結ぶ国道の慢性的な交通渋滞緩和を目的に、平成22年度末の供用を目指し鋭意建設中である。建設区間のうち那覇ふ頭港口部を横断する海底トンネル部分724mは8函の沈埋函（約90m/函）で構成する沈埋トンネル工法を採用している。（図-1に施工位置図を示す。）

本工事では、従来必要とされていた最終継手工を省略する新工法「キーエレメント工法」を世界で初めて採用した。今回、世界で2例目の施工となる最終沈埋函7号函の沈設・接合が完了したことに伴い、工事及び新工法の内容を報告するものである。

合が用いられる。これは水圧を利用して沈埋函端部に取



図-1 施工位置図

2.キーエレメント工法

キーエレメント工法とは、従来の最終継手工の1工法であるVブロック工法の接合原理を応用したキーエレメントと呼ばれる「くさび形」の沈埋函を沈設・接合することによって沈埋トンネルを貫通する工法である。（図-2参照）

(1) 最終継手工の選定

沈埋トンネル工法では、沈埋函同士の連結には水圧接



図-2 キーエレメント工法概念図

り付けたゴムガスケットを圧縮することにより仮止水し、連結する方法である。最終沈埋函連結後には沈設作業に必要なクリアランスと水圧接合時の移動によって連結部分と反対側に間隙が残る。これを最終継手部と呼ぶ。

(図-3参照)



図-3 最終継手概念図

本沈埋トンネルでは最終継手工として、施工実績のあった止水パネル工法やターミナルブロック工法、Vブロック工法、また新工法であるスライディングカプラー工法やキーエレメント工法が比較検討の対象となった。構造特性、施工性（大深度での潜水作業、航路への影響、那覇空港の空域制限など）、経済性及び工期を比較評価し、キーエレメント工法を世界で初めて採用した。（図-4参照）



図-4 本工事における最終継手位置図

(2) キーエレメント工法の特徴

キーエレメント工法の特徴として、以下の項目が挙げられる。

- ・従来の最終継手を省略することによる工程短縮
- ・一般函と同様の沈設設備の使用
- ・潜水作業の省略化
- ・水圧接合による完全な止水
- ・新たに開発した伸縮性止水ゴムによる施工誤差（トンネル延長、法線のずれ）の吸収

(3) 伸縮性止水ゴム

伸縮性止水ゴムはキーエレメント工法の核となる要素技術であり、中空構造のゴムガスケットである。既設沈埋函に折り畳んだ状態で設置され、接合時に内部にエアを注入することにより伸張・止水させることができる。（図-5、写真-1参照）

新工法であるキーエレメント工法を採用するにあたり、本工事仕様の伸縮性止水ゴムを製作し、止水性能試験及び圧縮特性試験を行った。実験により1継手あたり±6

0 mmの施工誤差吸収性能と施工水深4.5 mまでの止水性能を確認した。これより実施工では2継手分の±120 mmの施工誤差を吸収することが可能となった。

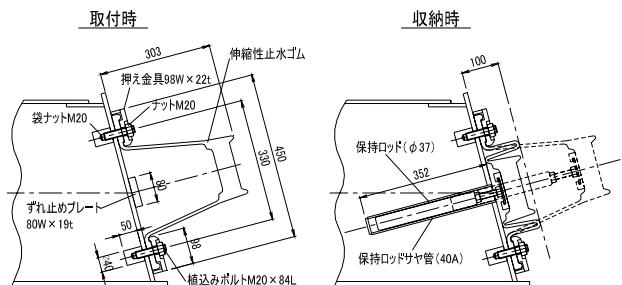


図-5 伸縮性止水ゴム



写真-1 伸縮性止水ゴム取付・収納状況

(4) 施工手順

キーエレメント工法の施工手順を以下に示す。

a) 沈設位置決定および沈降

最終沈埋函の沈設平面位置を決定し、鉛直に沈降する。（図-6参照）

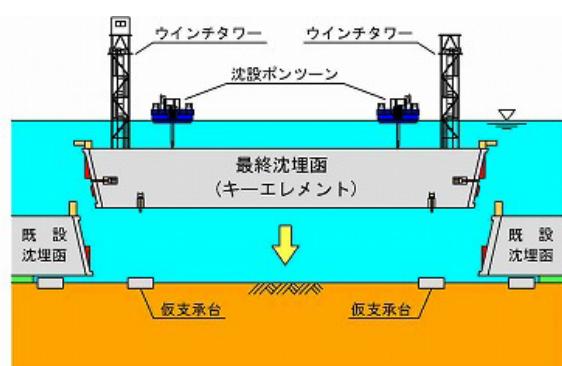


図-6 キーエレメント工法施工手順(1)

b) 仮支承台着底

微調整ガイドに微調整ガイドキーを挿入し、函軸直角方向を拘束する。支承ジャッキロッドを所定の高さまで

伸ばし仮支承台に着底する。（図 - 7 参照）

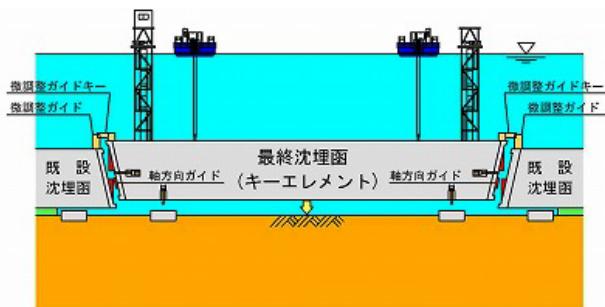


図 - 7 キーエレメント工法施工手順(2)

c) 一次止水位置決定

押出ジャッキロッドのストロークを調整し、函軸方向の位置決めを行う。鉛直ストッパー間が所定の間隔になるまで支承ジャッキにより沈降する。（図 - 8 参照）

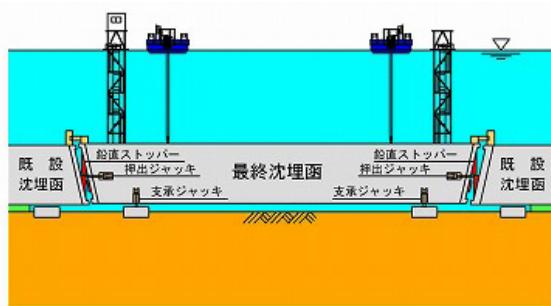


図 - 8 キーエレメント工法施工手順(3)

d) 伸縮性止水ゴムエア注入およびモルタル注入

伸縮性止水ゴム内部にエアを注入し、一次止水を確認する。バルクヘッド間の圧力を開放した後、伸縮性止水ゴム内部にモルタルを注入する。（図 - 9 参照）

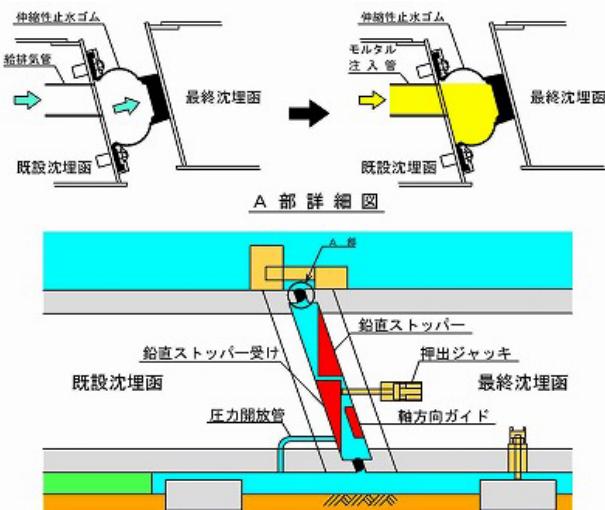


図 - 9 キーエレメント工法施工手順(4)

e) 水圧接合

モルタルが必要強度まで硬化した後、支承ジャッキダウンを行い、キーエレメントを伸縮性止水ゴムに預ける。バルクヘッド間を排水し、水圧接合を行う。（図 - 10 参照）

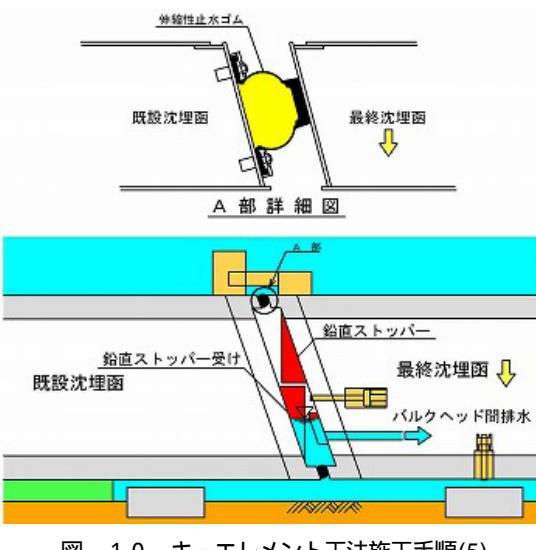


図 - 10 キーエレメント工法施工手順(5)

f) 接合部剛結

接合部を剛結する。（図 - 11 参照）

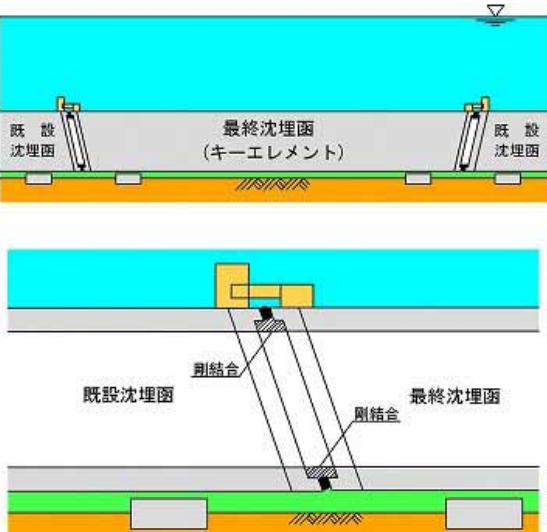


図 - 11 キーエレメント工法施工手順(6)

3 . 最終沈埋函 7号函の沈設・接合

(1) 耐波安定を考慮した沈設方法

本工事において、最終沈埋函の沈設場所は、防波堤開口部からの外洋波浪の進入海域であるため、耐波安定（波浪による浮き上がり防止）を考慮した沈設方法を検討・実施した。

沈埋函は、長周期波の影響により比較的小さな波高でも函に揚圧力と水平力が作用し動搖することが知られている。沈設作業時は既設函とのクリアランスが最終的に20cm程度であり、函が動搖して既設函に接触する事態となれば函が損傷、修復が困難になることも考えられる。例えば、函の動搖を最も避けたい沈設作業中では、周期7秒、波高0.5mの条件でも作業が困難になるとシミュレーション解析等で確認している。一方、沈設後の施工ステップを進めるに従い、函体の支持状態は変化するため、各ステップでの浮き上がりと滑動に対する波浪限界は異なり、台風の接近に対して十分な対策が可能な施工ステップも存在する。

耐波安定の観点からは、安定断面まで短期間で実施することが望ましいが、工期短縮にも限界がある。そこで、沈埋函の浮き上がりと滑動に抵抗する効果的な方法として、函の水中重量を増加させること（緊急追加バラスト）や、部材を追加する（既設函を利用して仮設的に固定する）などの対策が考えられた。これらを具体的に検討し5項目の対策を行った。（表-1参照）

表-1 耐波安定化の具体的対策

目的		具体的な内容
1	リスク低減	気象予測精度向上、港内波浪予測システム活用
2	鉛直抵抗力増大	沈設直後に微調整ガイドーの固定
3	鉛直抵抗力増大	鉛直ストッパ部連結部材溶接
4	工期短縮	函底コンクリート止め碎石昼夜2ワッチ施工
5	鉛直抵抗力増大	緊急時車道部追加バラスト実施(止水壁の構築)

a) 曳航・沈設の可否判断方法

曳航・沈設作業を開始して、安定断面となるまでには標準的な施工方法では15日間を要する。

ここで重要なのは沈設から安定断面までの施工ステップが進行するに従い順次安定度が増すわけではなく、例えば、沈設直後は台風等の接近に対して追加バラスト等で比較的十分な安定対策が可能であるが、水圧接合時の支承ジャッキ・ダウン時には比較的不安定であり、静穏な海象条件が必要である。

沖縄の場合、熱帯低気圧発生から2~3日で台風となり、4~5日で接近する例もあることから、日々の気象予測と港内波浪予測により、各工程の実施可否判断を対策可能なタイミングで行うことは重要であった。実際に、施工ステップに応じた波浪限界を事前に検討し、曳航の可否や沈設作業の可否、水圧接合作業の可否、緊急対策の実施要否など7回に及ぶ作業可否判断会議を実施した。（表-2参照）

b) 急速施工方法

最終沈埋函7号函における曳航開始から安定断面に至るまでの急速施工方法を策定するにあたり、現場及び施工条件より本工事において留意した点を表-3に示す。

表-3 最終沈埋函7号函の急速施工に関する留意点

項目	急速施工に関する留意点
曳航工	・沈設場所掘割部への引込作業に時間を要する
艤装品設置・撤去工	・引込、係留作業における止水ゴム防護材の残置 ・一般函より深度の深い潜水作業があるため、夜間作業を回避
艤装品撤去工	・掘割部で施工するため、副、主ウインチタワーの順に撤去（片押し施工） ・沈設場所における主・副ウインチタワー撤去を1日で施工（工程短縮）
コンクリート止め碎石	・掘割部で施工するため、ウインチタワー撤去後に碎石投入を開始 ・2ワッチ体制での昼夜施工（工程短縮）

表-4に曳航開始から安定断面に至るまでの施工日数について、標準案と対策案を比較整理した。

表-4 安定断面化日数の比較

項目	標準案	対策案
曳航工	1日	1日
艤装品設置・撤去工	1日	1.5日
作動確認工	1日	1日
沈設工	4日	4日
艤装品撤去工	3日	2日
コンクリート止め碎石	6日	3日（昼夜施工）
安定断面までの日数	曳航開始から16日目	曳航開始から12日目

表-2 曳航・沈設の可否判断タイムスケジュール

	3日前	2日前	1日前	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目	9日目	10日目	11日目	12日目
沈埋函曳航															
沈埋函係留															
艤装品撤去・取付															
作動確認・沈設訓練															
沈埋函沈設															
伸縮性止水ゴムモルタル															
支承ジャッキダウン															
函外艤装品撤去															
コンクリート止め碎石投入															
追加バラスト															
仮固定材設置															
既設函と新設函の連結結合															
車道バラスト注水															

Key events and decision points highlighted in the timeline:

- 曳航可否判断(1):** Occurs on Day 1, after Navigation (1 day).
- 曳航可否判断(2):** Occurs on Day 3, before Navigation (3 days).
- 沈設可否判断(1):** Occurs on Day 4, before Navigation (4 days).
- 沈設可否判断(2):** Occurs on Day 5, before Navigation (5 days).
- 止水ゴムエア注入可否判断:** Occurs on Day 6, before Navigation (6 days).
- ジャッキダウン可否判断:** Occurs on Day 7, before Navigation (7 days).
- (水圧接合):** Occurs on Day 8, before Navigation (8 days).
- 養生:** Occurs on Day 9, before Navigation (9 days).
- ジャッキダウン:** Occurs on Day 10, before Navigation (10 days).
- 正副タリヤ撤去:** Occurs on Day 11, before Navigation (11 days).
- 車道バラスト注水可能:** Indicated from Day 12 onwards.

表 - 5 に最終沈埋函 7 号函における曳航開始から安定断面に至るまでの実施工工程を示す。

表 - 5 急速施工実施工程

工種	1日目 4/30	2日目 5/1	3日目 5/2	4日目 5/3	5日目 5/4	6日目 5/5	7日目 5/6	8日目 5/7	9日目 5/8	10日目 5/9	11日目 5/10	12日目 5/11
曳航工												
艤装品設置・撤去工										仮固定材他		
作動確認工 総合作動確認					■							
沈設工 本沈設				■								
伸縮性止水ゴム モルタル注入工						■	昼夜 (養生)					
水圧接合							■					
艤装品撤去工						ポンプ			タワー			
函外工 コンクリート止め碎										昼夜施工		

(2) 最新技術を駆使した沈埋函の沈設・接合作業

最終沈埋函の沈設では両側端部（一般函では片側端部のみ）の相対位置を把握し、伸縮性止水ゴムを用いて一般函とは異なる接合作業を行うため、監視用カメラやGPS位置監視システム、水中距離計測装置等の最新技術を駆使した沈設・接合作業を実施した。（写真 - 2～6 参照）



写真 - 2 本沈設状況



写真 - 3 監視用カメラ（微調整ガイドキー）



写真 - 4 監視用カメラモニター（右側は函体貫入距離計）



写真 - 5 GPS位置監視システムモニター

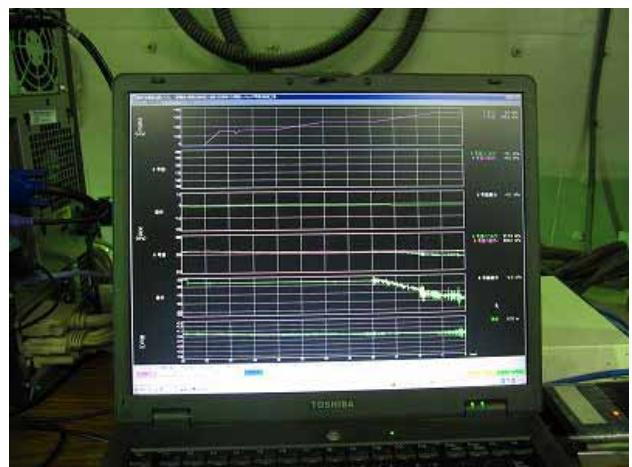


写真 - 6 圧力計測システムモニター

(3) 測量結果

沈埋函の形状寸法の決定にあたっては、陸上の基準点をもとに既設6・8号函の沈設出来形の測量結果に加え、平成19年度に実施した6号函と8号函を直接測量した水中長距離計測（ピアノ線を用いた水中での測量技術）の結果含め総合的に決定した。

7号函沈設後に行った函内測量結果と、平成19年度の水中長距離計測の誤差は6mm～13mmであった。

これは、水中長距離計測が十分な精度を有し、また、伸縮性止水ゴムの測量誤差吸収能力120mmに対しても十分な精度であることが分かった。（表-6参照）

表-6 各測量方法の比較

測量方法	測点間距離(m)		座標閉合差	精度
	港外側	港内側		
水中長距離計測(H19.11)	93.328	93.339	-	-
沈設後函内測量(H21.5)	93.334	93.352	0.012	1/141848
沈設前函内測量(H20.10)	93.331	93.342	0.022	1/68000

4. 今後の課題

今後の課題として、キーエレメント函の函長距離を決定するにあたり、陸上（立坑から函内）より行う間接測量（基準点測量）の精度を補うため、水中での直接計測（水中長距離計測）を実施したが、コスト縮減を図る上で、より精度の高い間接測量手法の工夫を図りたい。

また、最終沈埋函沈設前に既設対応函（6・8号函）の伸縮性止水ゴムのうち、上床版側の一部において止水ゴムの押し出し状況が確認された（写真-1、写真-7参照）。この現象は、沈埋函の本体コンクリート浮遊打設時の沈み込みにより止水ゴム内に残った空気が水圧により上部へ押し出され、その空気圧により止水ゴムが押し出されたものと推察される。これについては、浮遊打設中に伸縮性止水ゴム内部に残った空気の吸引、又は伸縮性止水ゴムに内包されている保持ロッドの本数を増やすことで伸縮性止水ゴムの押し出し現象を防ぐことが可能と思われる。



写真-7 伸縮性止水ゴムの押し出し状況

5. おわりに

今回の最終7号函施工においては、慎重な気象・海象の予測及び施工プロセスの判断により、一連の最終沈埋函の沈設・接合作業を滞りなく終えることができた。那覇臨港道路沈埋部において世界で2例目の沈設・接合により、キーエレメント工法は沈埋トンネルにおける従来の最終継手工を省略できる工法としてその有効性が実証された。また、6～8号函の函内測量並びに水中長距離計測に基づいて決定した最終沈埋函の延長は、伸縮性止水ゴムの施工誤差吸収性能で十分対応できる範囲（平均約20mm）であったことが確認できた。