

ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事の 函体沈設に関する実験的検討

HYDRAULIC PHYSICAL MODEL TEST FOR THE TUNNEL IMMERSION OF RAILWAY BOSPHORUS TUBE CROSSING

織田幸伸¹・伊藤一教²・上野成三¹・小山文男³・木村政俊³・栄枝秀樹⁴
Yukinobu ODA, Kazunori ITO, Seizo UENO, Fumio KOYAMA, Masatoshi KIMURA
and Hideki SAKAEDA

¹正会員 工修 大成建設(株)技術センター土木技術研究所(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 工博 大成建設(株)ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事

³正会員 大成建設(株)ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事

⁴(株)パシフィックコンサルタンツインターナショナル プロジェクトマネジメント事業部
(〒206-8550 東京都多摩市関戸1丁目7番地5)

The immersed tunnel project crossing over the Bosphorus Strait located in Istanbul, Turkey, is under construction. The immersion procedure was carefully examined by means of a physical model test, because the current field of the Bosphorus Strait is complicated and has two-layer system consisting of surface southwards flow and bottom northwards flow. The objectives of the model test are: to measure the mooring forces for all immersion processes, to check behavior of a placing barge and a tunnel element during immersion process, and to confirm immersion procedure using winch work. A seventeen mooring wires are used for completing the immersion of a tunnel element, and the mooring forces of all wires in each immersion process were measured. Based on the average/maximum forces of wires through the all model tests, the designed winch capability was determined.

Key Words : the Bosphorus Strait, immersed tunnel, immersion, mooring, two-layer flow, drag force

1. 目的

現在施工中のボスポラス海峡横断トンネル¹⁾は、トルコのボスポラス海峡の南に位置し、全長1387m、最大水深60mの鉄道トンネルである(図-1参照)。トンネルは、沈埋トンネル工法によって施工され、11函の沈埋函より構成される。

ボスポラス海峡は、表層の南へ流れる淡水系の流れと

底層の北へ向かう塩水系の流れによる二層流となっている^{2),3)}ことが知られている。施工位置では、表層の流速は2m/sを越える場合があり、また底層の流速は定常的に0.5~1m/sの値を示している。このような複雑な流況下での沈埋トンネルの施工は過去に例がなく、施工の安全性、施工精度を確保するためには、函体沈設時の係留力を把握することが重要となる。本研究は、この沈設時の係留力と函体の挙動を水理実験によって把握し、2層流場に適した施工手順を提案することを目的とする。

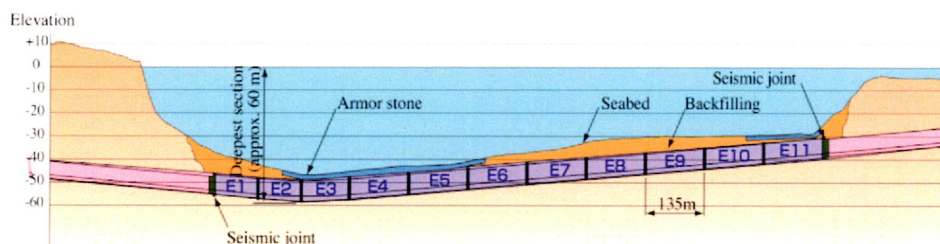


図-1 ボスポラス海峡横断トンネル

2. 実験方法

(1) 施工手順

実際の沈設手順の概要を以下に示す。沈設にはプレーシングバー（PB）を使用し、その手順は、図-2に示すように、曳航、回頭、沈設の大きく3つに分けられる。

Step1：函体を内側に抱えたPBを一点係留により上流側から設置位置まで移動し、函体を中層まで降ろす。

Step2：PBを係留ワイヤー操作により回頭する。

Step3：函体の位置を操函ワイヤーにより調整しながら設置位置に沈設する。

PBは、9本の係留ワイヤーにより係留され、函体は4本の吊下げワイヤーによりPBより支持される。沈設の最終位置調整に用いる4本の操函ワイヤーは、プレーシングバーから函体の4隅をそれぞれ通ってアンカーに係留され、沈設作業の最終段階で、函体の動揺の低減と、位置の微調整に用いられる（図-3、4参照）。

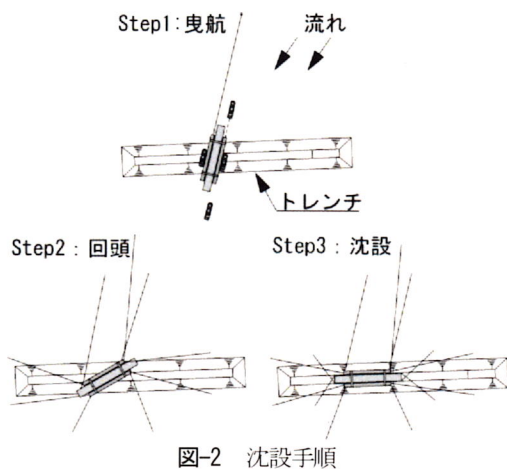


図-2 沈設手順

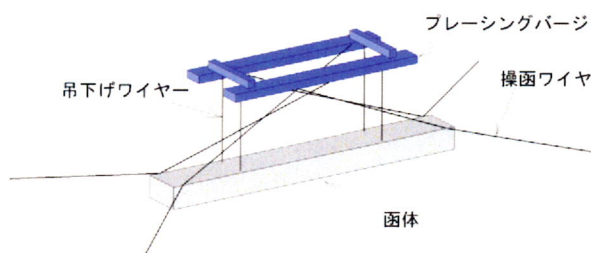


図-3 吊下げワイヤー・操函ワイヤー

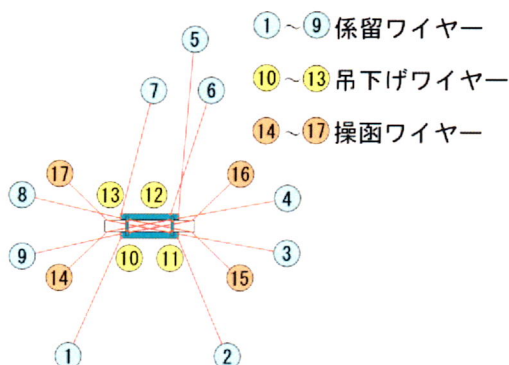


図-4 係留索配置

(2) 実験条件

実験は、幅4m、長さ13.6mの平面水槽で行った。実験の諸元を表-1に示す。実際の流れは二層流であるが、実験水槽でこれを再現するのは難しいため、実験は一様流で行い、後述する解析的な補正により二層流の影響を考慮した。沈設を実施する表層の最大流速は1.5m/sである。

PB及び函体の模型には、17本の係留索（ワイヤーΦ0.27mm）をウィンチを介して設置し、端部に係留力を計測するためのリングゲージを取り付けた。全ての係留索長は、ウィンチにより遠隔操作可能とし、実際の沈設作業と同様の手順を再現しながら、係留力を計測した。PB及び沈埋函の挙動は、上部からビデオカメラにより撮影し、画像を解析することにより求めた。

(3) 実験ケース

実験は、前述の3つのステップそれぞれについて行った。表-2及び図-5に各ケースの函体鉛直位置と流れの向きを示す。case1は一点係留の状況であり、函体を水面付近に保持した状況と、中層まで下げた状況を対象とした。case2は、函体を中層に保持したまま回頭している状態であり、90°と74°の2種類の流向について実験を行った。この74°は、トンネルラインが流れに対して実際に傾いている値である。case3は17本全ての係留索を用いて函体を目標位置に設置する状況であり、函体を中層にある状態から、トレンチ内に入るまで下降する間を対象とした。

表-1 実験諸元

	実験	実機
縮尺	1/120	-
流れ	14cm/s	1.5m/s
函体寸法	L 115.8cm B 150cm H 8.2cm	L 139m B 18m H 9.8m
水中重量	4.292N (0.4380kgf)	7417kN (756.8tf)
水深	40cm	48m

表-2 実験ケース一覧

ケース	Step	流向	係留ワイヤー	函体鉛直位置 [m]
case1-1	1	-	⑤, ⑩~⑬	0
case1-2		-	⑤, ⑩~⑬	24
case2-1	2	90°	⑤~⑦, ⑩~⑬	24
case2-2			⑤~⑦, ⑩~⑬	
case2-3		74°	⑤~⑧, ⑩~⑬	
case2-4			⑤~⑧, ⑩~⑬	
case3-1	3	90°	①~⑬	24~43.08
case3-2			①~⑬	43.08
case3-3			①~⑬	52.88
case3-4		74°	①~⑬	24~43.08
case3-5			①~⑬	43.08
case3-6			①~⑬	52.88

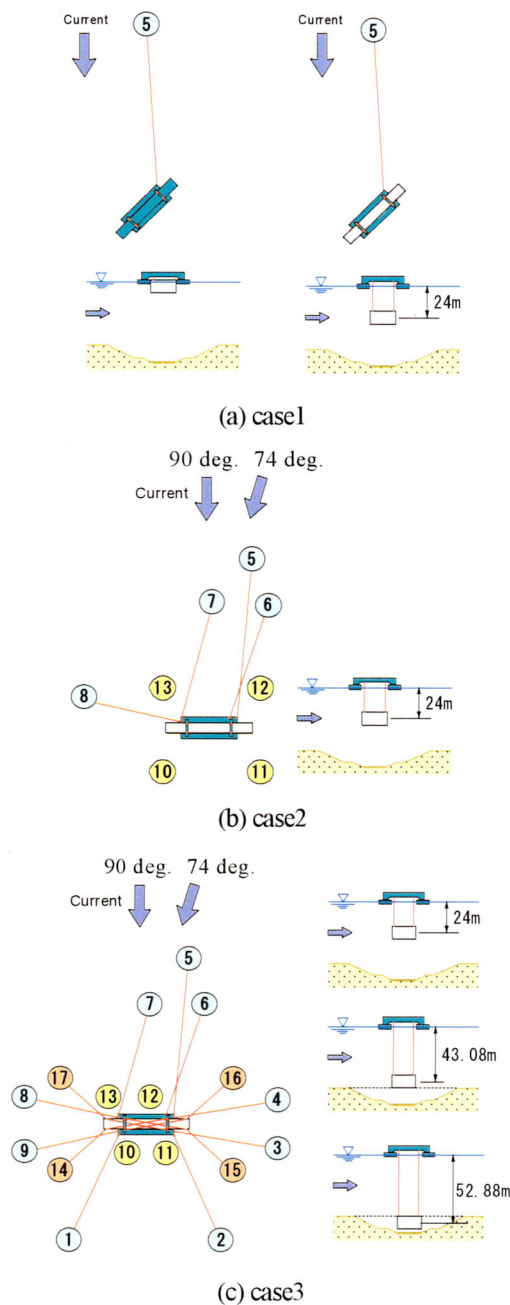


図-5 実験ケース

3. 実験結果

(1) Step1 : 曳航 (case1)

ワイヤー⑤に働く係留索張力の計測結果を時間平均した値及び最大値を表-3に示す。なお、以降の実験結果は、全て実機換算したものを示す。表-3によれば、函体を降ろすことにより、時間平均した係留力が若干増加していることが分かる。函体を水面に保持している状態 (case1-1) では、函体の天端がほぼ水面にある。函体を降ろすことにより函体が完全に没水し、抗力係数が大きくなるため、係留力が増加したものと考えられる。ただし、投影面積はほとんど変化していないため、その増加量は小さい。

表-3 Step1の係留力実験結果

係留索	ケース	係留索張力 [kN]	
		平均	最大
⑤	case1-1	549	745
	case1-2	568	676

(2) Step2 : 回頭 (case2)

case2の結果を図-6に示す。ここで、係留索の⑤と⑥はほぼ同じ方向であるため、これらの張力を合わせたものを示している。

case2-1, 2とcase2-3, 4を比較すると、係留索⑧の有無による張力の違いは、大きくないことが分かる。係留索⑧の目的は、トンネルライン方向の位置調整であるが、その他の3本の係留索 (⑤～⑦) とは直交に近い関係にあるため、係留索⑧によって函体をトンネルライン方向に移動しても、他の係留索の張力にはあまり影響を与えないことが分かる。

流れの入射角に関しては、90° と74° で結果に大きな違いは現れなかった。

吊下げワイヤーに働く張力は、4本ほぼ同等で、時間平均値で約2,000kNとなった。函体の水中重量は7,417kNであるためこれを1/4すると1,854kNとなり、実験結果はこれより少し大きな値となった。これは、函体に水平方向の抗力が働くことにより、吊下げワイヤーに函体の水中重量と抗力の合力が働いたためであり、この時吊下げワイヤーは、垂直から少し傾いている。

Symbol	ケース	係留索	流向
○	case2-1	⑤⑥⑦	90deg.
△	case2-2	⑤⑥⑦	74deg.
□	case2-3	⑤⑥⑦⑧	90deg.
×	case2-4	⑤⑥⑦⑧	74deg.

Line	
—	最大
- - -	平均

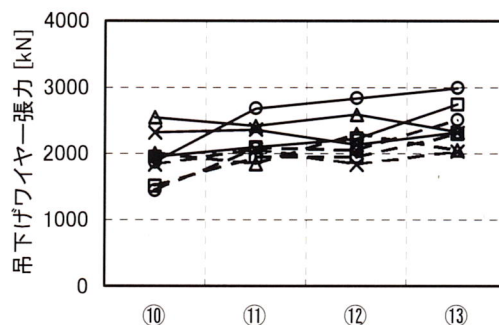
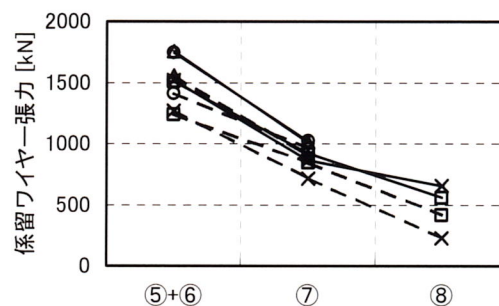


図-6 Step2の係留力実験結果

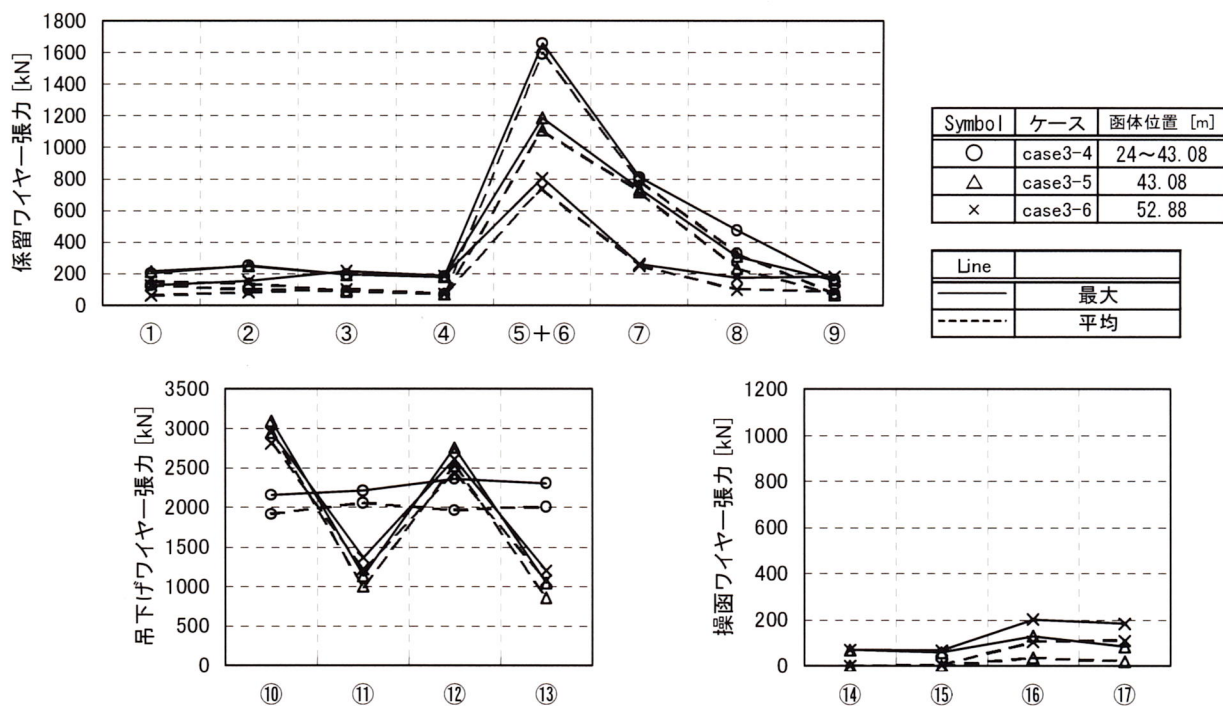


図-7 Step3の係留力実験結果（入射角74°）

(3) Step3：沈設（case3）

case3の結果を図-7に示す。実験は流れの入射角90°と74°の2種類について行ったが、Step2と同様、その違いは小さかった。ここでは、入射角74°の結果のみ示す。

case3-4とcase3-5を比較すると、係留力は、函体が中層にある時が一番大きく、底面に近づくとき小さくなること分かる。函体がトレンチ内に入る直前と入った後（case3-5とcase3-6）を比較すると、係留ワイヤー⑤～⑦の係留力が小さくなっていることが分かる。3本の張力の減少量を合わせると、900kN程度となり、函体がトレンチの内側に入ることにより、抗力が大幅に減少することが分かる。

吊下げワイヤーの係留力は、case3-4では4本がほぼ同

じ値となっているのに対し、case3-5、case3-6では⑪⑬の係留力が小さくなっている。4本の係留索長さの違いにより、張力の偏りが発生していると考えられる。実験では、模型のウィンチ能力により、微妙な長さ調整が出来なかったため、この様な不均等張力が発生した。実際の作業時にはこれらの張力を管理しながら、均等な張力が発生するようにウィンチを調整する必要がある。

(4) 係留索張力のまとめ

各実験ケースの結果をまとめたものを表-4に示す。表-4はステップ毎に、実験ケースの最大の値を求め、それらの値を比較し最大の係留索張力を各係留索についてまとめたものである。この表から、全てのステップを通じた各係留索、ウィンチの必要な能力を求めることが出来る。その際、係留中に係留索を巻き上げるためには、

表-4 実験結果のまとめ

Step	係留ワイヤー [kN]									
	①	②	③	④	⑤	⑤+⑥	⑦	⑧	⑨	
1	平均：最大	平均：最大	平均：最大	平均：最大	568：745					
2						1,558：1,754	960：1,019	412：657		
3	147：216	235：363	98：216	108：186		1,588：1,666	1,049：1,127	549：686	127：186	
最大値	147：216	235：363	98：216	108：186	568：745	1,588：1,754	1,049：1,127	549：686	127：186	

Step	吊下げワイヤー [kN]			
	⑩	⑪	⑫	⑬
1	平均：最大	平均：最大	平均：最大	平均：最大
2	2,009：2,538	2,078：2,675	2,293：2,832	2,509：2,989
3	2,950：3,097	2,058：2,264	2,519：2,764	2,205：2,568
最大値	2,950：3,097	2,078：2,675	2,519：2,832	2,509：2,989

操函ワイヤー [kN]			
⑭	⑮	⑯	⑰
平均：最大	平均：最大	平均：最大	平均：最大
137：235	59：98	118：206	108：186
137：235	59：98	118：206	108：186

表中の平均以上の巻き上げ能力が必要であり、また係留力の非定常性を考慮すると、PBをその位置に保持するためには、表中の最大値以上のブレーキ力が必要であることが分かる。ただし、表に示した値は一樣流の実験によるものであり、実際の流況は、深くなるほど流速が小さくなる。言い換えれば、この値は過大な値を与えることになるため、後述するように、この流速の違いを解析的に補正して、ウィンチ、係留索の必要能力を算定する必要がある。

(5) 操函ワイヤーによる函体動揺の低減

沈設中の函体は、流速の非定常性、函体周りに発生する渦の影響により、長周期で動揺している。特に、底面に近づくほど吊下げワイヤーが長くなり、ヨーイングの固有周期が長くなるため、この動揺は低減し難くなる。函体をトレンチ内に設置する際には、この動揺が設置精度を確保する上で問題となる。

図-8は、トレンチ内での操函ワイヤーの有無による、函体の動揺量の違いを示したものである。操函ワイヤーがない場合には、函体の端部で2m程度の動揺が発生しているのに対し、操函ワイヤーを使用することにより50cm以下に低減されている。操函ワイヤー自体にはそれほど大きな張力は発生していないが、吊下げられた函体の動揺を低減するには、有効であることが分かる。

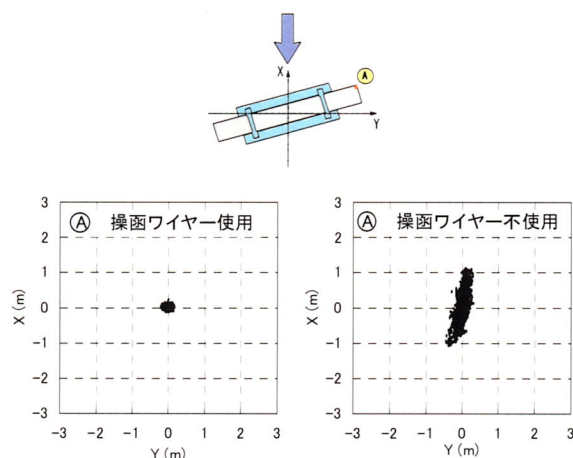


図-8 操函ワイヤーによる函体動揺の低減効果

4. 実験結果の補正

(1) 抗力及び水中重量の補正

前述したように、実験と実機との違いにより、表-4の結果は過大な値を示している。そこで、この違いを解析的に補正することにより、妥当なPBの設計係留力を求める。

実験結果の補正として、流況の違いによる補正と函体形状の違いによる補正の2種類の補正を行う（表-5参照）。前者は、実際は二層流であるところを一樣流で実

験しているため、実験では中層以下にある函体が実際よりも大きな抗力を受けていることを補正するものである。後者は、実験時に設定していた函体形状と、その後設計された実際の函体の形状が異なるため、これを補正するものである。

まず、流況の違いによる補正を行うため、対象とする現地の流況を設定する。表層流速は、沈設の実施条件として1.5m/sとする。これに対し回頭時には、沈設開始前に予め流速を計測し、流速の最も小さい深度まで函体を降ろすため、函体に働く流れは非常に小さい。しかしながら、この最小流速を示す深度は時間的に変動するため、ここでは安全側の値として、中層以下の流速を表層の1/2の0.75m/sとした。抗力は流速の2乗に比例するため、函体に働く抗力は1/4となる。

函体の形状変化の影響は、抗力と水中重量に現れる。抗力係数を一樣と仮定すると、函体に働く抗力は投影面積に比例する。厳密には、斜めから流れが作用する場合には、形状の違いが抗力係数に影響するが、ここではその影響は小さいとした。函体側面の投影面積は、模型の実機換算値1,362.2m²に対し、実際の函体は1,204.0m²である。したがって、実際の函体に働く抗力は、実験の0.884倍であると考えられる。また水中重量は、実験では7,417kNとしたのに対し、実際の函体は5,880kNの計画であるため、水中重量は0.793倍になる。

表-5 補正の種類と補正係数

流況の違いによる補正		
流速	実験	一樣流 1.5m/s
	実機	中層 0.75m/s
補正係数		$(0.75/1.5)^2 = 0.250$
函体の投影面積の違いによる補正		
投影面積	実験	1362.2m ²
	実機	1204.0m ²
補正係数		$1204.0/1362.2 = 0.884$
函体の水中重量の違いによる補正		
水中重量	実験	7417kN
	実機	5880kN
補正係数		$5880/7417 = 0.793$

(2) 各係留索張力の補正方法と補正結果

a) 係留索①～⑨

係留索①～⑨は、函体の中層にあるときにもっとも大きな張力が生じている。PBと函体の抗力係数が等しいと仮定すると、係留力に含まれるPBに働く抗力と函体に働く抗力の比は、投影面積の比に等しくなる。PBと函体の実験模型の投影面積はそれぞれ162m²、1362.2m²であるため、その比は0.106:0.894となる。PBに働く抗力は、実験の結果をそのまま採用し、函体に働く抗力に対して上述の流速及び投影面積の違いによる補正をすると、全体に働く係留力は、 $0.106 + 0.894 \times 0.250 \times 0.884$ となり、補正係数として0.304が得られる。

表-6 実験結果と設計採用値

	係留ワイヤー [kN]																	
	①		②		③		④		⑤		⑤+⑥		⑦		⑧		⑨	
実験結果	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大
	147	216	235	363	98	216	108	186	568	745	1,588	1,754	107	115	549	686	127	186
補正結果	45	66	72	110	30	66	33	57	173	226	483	533	33	35	167	209	39	57
設計値	巻上	ブレーキ	巻上	ブレーキ	巻上	ブレーキ	巻上	ブレーキ	巻上	ブレーキ	巻上	ブレーキ	巻上	ブレーキ	巻上	ブレーキ	巻上	ブレーキ
	294	588	294	588	294	588	392	784	686	1,372	1,176	2,352 ⑥:490、⑥:980	490	980	392	784	294	588

	吊下げワイヤー [kN]			
	⑩	⑪	⑫	⑬
実験結果	平均	最大	平均	最大
	2,950	3,097	2,078	2,675
補正結果	2,339	2,456	1,648	2,122
設計値	巻上	ブレーキ	巻上	ブレーキ
	2,509	5,018	2,509	5,018

	操函ワイヤー [kN]			
	⑭	⑮	⑯	⑰
実験結果	平均	最大	平均	最大
	137	235	59	98
補正結果	-	-	-	-
設計値	巻上	ブレーキ	巻上	ブレーキ
	245	490	245	490

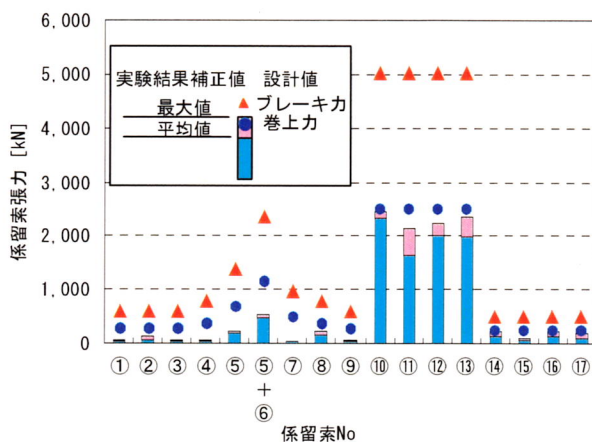


図-9 実験結果と設計採用値

ここに示した施工手順では、step1においてPBを回頭する前に函体を中層まで降ろす。通常の沈設手順では、函体を水面付近に抱えたまま、PBをトンネルラインに平行に係留する。この方法により函体を沈設した場合、ここでの補正は函体形状による0.884のみとなり、補正係数は $0.106 + 0.894 \times 0.884 = 0.896$ となる。中層での函体回頭と比較すると、約3倍の係留力が必要となり、ここで示した沈設の施工手順が、係留力の低減に有効であることが分かる。

b) 係留索⑩～⑬

吊下げワイヤーに働く張力には、函体の水中重量と抗力の成分が含まれるが、実験結果をこれらに分けることは難しい。ここでは、それぞれの補正係数である0.793と0.221 ($=0.250 \times 0.884$)のうち、安全側の値として0.793を両者の合力である吊下げワイヤー張力の補正係数とする。

c) 係留索⑭～⑰

操函ワイヤーに働く張力は、函体がトレンチ内に入るため、函体の抗力を評価することが難しく、補正係数の算出が困難である。また、函体の最終設置位置を調整する上で重要な係留索であることから、操函ワイヤーについては張力の補正をしないこととした。

d) 補正結果

表-6及び図-9に各張力の補正結果とその結果をもとに設定したPBのウィンチ能力設計値を示す。なお、最終的に採用したウィンチ能力は、中層流速が約1.25m/sまで耐えられるように安全を見込んだものとなっている。

5. 結論

本研究では、二層流の強潮流下において沈埋トンネルを沈設する際の、係留力及びその施工方法を確認するための水理実験を行った。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 実際の一連の沈設作業を再現することにより、各係留索に働く張力を求めた。実験結果を、現地の流況に合致するように補正し、PBの必要ウィンチ能力を算出した。
- 二層流下では、中層で流速が小さくなるため、PBを回頭する前に函体をこの深度まで降ろすことにより、係留力を低減することが出来る。
- 操函ワイヤーを使用することにより、底面付近での函体の動揺を低減することが出来る。

参考文献

- 1) 日本海洋開発建設協会 海洋工事技術委員会編：21世紀の海洋土木技術，山海堂，2006。
- 2) 織田幸伸・伊藤一教・高山百合子・上野成三・栄枝秀樹：ボスボラス海峡横断鉄道トンネル建設工事の施工支援ツールとしての3次元流動シミュレーション，海洋開発論文集，Vol. 21，pp. 903-908，2005。
- 3) 織田幸伸・伊藤一教・上野成三・勝井秀博・東江隆夫・小山文男・栄枝秀樹：ボスボラス海峡横断鉄道トンネル建設工事における流況観測と流況解析，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1421-1425，2005。