

ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事での 流況予報システムによる函体沈設の可否判断

"Go/no go" Decision of the Immersion Work made by the Current Forecast System
in Bosphorus Tube Crossing

織田幸伸¹, 伊藤一教², 本田隆英², 上野成三², 小山文男³, 栄枝秀樹⁴

Yukinobu ODA, Kazunori ITO, Takahide HONDA, Seizo UENO,
Fumio KOYAMA and Hideki SAKAEDA

The Bosphorus tube crossing, which is constructed by the immersion tunnel method, is now under construction in Turkey. The current of Bosphorus strait has two-layer current system and it is very variable due to meteorological condition. The immersion process, towing, mooring and lowering, should be executed continuously, so it must be confirmed before towing that the current condition meets the construction limitation among the immersion work. The authors have already developed the current forecast system and it is in operation on the site. In this paper, the verification result and the process making the "go/no go" decision are described.

1. はじめに

現在, トルコのボスポラス海峡に, 沈埋トンネル工法により鉄道トンネルを建設中である。ボスポラス海峡は, 風や気圧の影響により不規則に潮流が変化し, その流れは最大で 2 m/s を越える。また, トンネルを施工する海峡の南端は, 黒海から流入する淡水系の流れとマルマラ海から逆向きに流入する流れの二層流となっており, 流況をより複雑にしている。

トンネルの沈設時, 曳航, 係留, 沈設の一連の作業は継続して行う必要があり, 途中で作業を中断することは, 安全性, 経済性の両面で大きなリスクをとまなう。したがって, この間に海峡の流れが設定値を上回らないことを, あらかじめ確認して沈設可否の判断をする必要がある。著者らはこれまで, 気象および流況の長期現地観測を実施し(織田ら, 2005), その結果に基づき潮流予報システムを開発して現地に適用した(織田ら, 2007a, 2007b)。本論では, システムの運用を通じて, その誤差の特性を明らかにし, 実際の沈設可否判断の判断手順について検討した結果を示す。

2. 流況予報システム

流況予報システムの概要について, 以下に示す。なお詳細については, 参考文献(織田ら, 2007a, 2007b)を参照されたい。流況予報システムは, オンライン観測システムと, 予測システム, 流況情報配信システムの3つのシステムからなる。図-1に流況予報システムの概要を

示す。オンライン観測システムでは, 図-2に示す観測地点において, 海峡両端における水位, 風, 気圧およびトンネル位置の代表点における流速を1時間に1回計測する。ここで流速の観測点 StR はトンネルラインのアジア側の端部に位置し, 海底設置型のドップラー多層流速計(ADCP)により, 鉛直方向の流速分布を1m毎に計測している。観測結果は, インターネットを通じてリアルタイムに予測システムに転送される。また, 1日2回, 気象サービスから気象予報が送られ, 予測システムはこれらのデータを用いて, 海峡両端の水位差とトンネル位置での流況を予測する。予測は, オンライン観測結果を初期値として1時間毎に更新される。観測結果と予測結果は, 流況情報配信システムに送られ, インターネットを通じて, いつでも結果を参照することが出来る。

予測システムは, まず海峡両端の水位を予測し, 次にその水位差から流況を予測する。ボスポラス海峡の水位は, 気圧と風により大きく変化する。予測モデルでは, これら気象と水位の関係をモデル化し, 現在の値を初期値として気象予報結果をもとに水位を予測する。流速の予報モデルでは, まず水位差と流速の関係を1つの関数

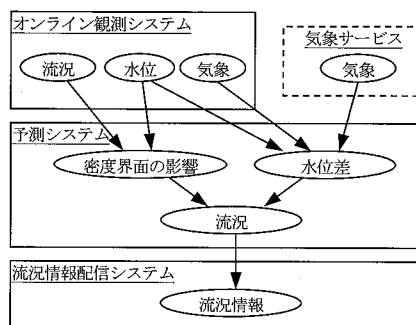


図-1 流況予報システムの概要

1 正会員 工修 大成建設(株)技術センター土木技術研究所
2 正会員 博(工) 大成建設(株)技術センター土木技術研究所
3 正会員 工修 大成建設(株)国際事業本部
4 (株)PCI

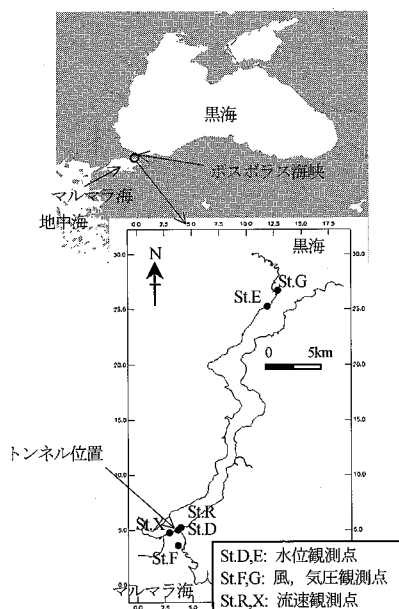


図-2 オンライン観測地点

でモデル化した。ただし、密度界面の影響により、両者の関係はこの関数とは必ずしも一致しない。そこで、水位差と流速の現在の観測結果をこの関数に当てはめたときの差異が密度界面の影響として、モデルに取り込んだ。

3. 予報結果

予報結果の例を図-3に示す。図-3は、非常に大きな流況変化が起きた時の予報結果であり、気圧、風、水位および流速の予報結果と観測結果を示している。なお、気圧、風はマルマラ海側の値を代表値として示した。また流速は、St.Rの水深7mにおける値を示しており、値は、絶対値にその流向を示すため北向きの時は $-$ 、南向きの時は $+$ を付けて示した。

水位差の観測結果を見ると、予報時(10/30 12:00)にはほぼ水位差0であったが、翌日には水位差が大きくなりおよそ0.55mとなった。一方予報値は、時間的な遅れはあるものの、0.5mまでの水位差の上昇を予報しており、現象を精度良く予報していることが分かる。また流速を見ると、水位差の上昇にともない、観測値は流速0から2m/s(南向きなのでマイナス表示)まで上昇している。予報値は、水位差と同様に時間的な遅れがあるものの、これを精度良く予報している。

水位差が大きくなったのは、黒海側の水位上昇とマルマラ海側の水位低下によるものだが、これらの水位変化は主に気圧と風によって起こることが、過去の観測結果から明らかとなっている。気圧変動を見ると、その上昇量は7hPaであり、過去の観測結果によれば、この影響はマルマラ海側の水位を6cm程度下げのみである。マ

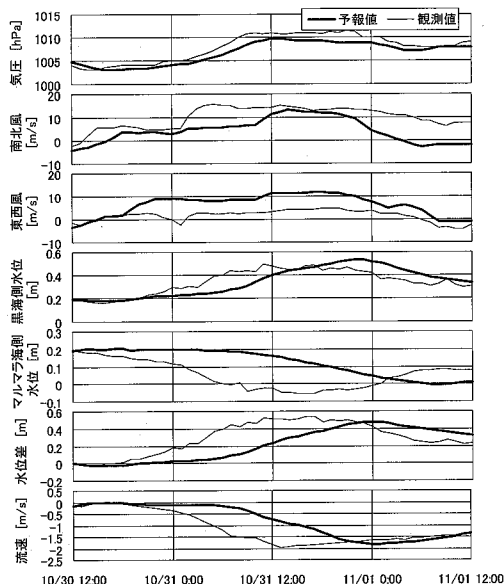


図-3 予報結果の例

ルマラ海側は26cm程度水位が低下していることから、その差20cmは風の影響によるものであると考えられる。また黒海側は気圧の影響が小さいため、主に風の影響により30cm程度上昇したのと考えられる。南北風の観測結果によれば、15m/s程度の北風が吹いている。10m/s以上の風が吹くと、水位は大きく変動することが分かっており、この北風により水位差が急激に大きくなったのと考えられる。南北風の予報値は、風速についてはほぼ正しく予報しているものの、時間的に遅れている。このため、水位、流速の予報値に遅れが生じている。

南北風と水位差の観測値を比較すると、10/31 3:00頃に風速は最大値を示しているのに対し、水位差は10/31 11:00頃に最大となっており、8時間程度の遅れが生じている。一方予報値は、10/31 14:00に風速最大となり、10/31 23:00に水位差が最大となっており、その遅れは約9時間である。この風に対する水位の時間遅れは、風の吹寄せ効果が発達するのにある程度の時間が必要なためと考えられるが、予報値はこの時間遅れについても精度良く予報できていることが分かる。

図-4は、1日1回48時間の予報をし、その間の水位差と流速の最大値を示したものである。また、観測値についても同期間の同様の値を示した。48時間の間の最大値を示しているため、潮汐による変動が支配的な海峡であればほぼ15日周期のなめらかな変動を示すが、観測値は不規則に変動しており、潮汐の影響が小さいことが分かる。また予報値は、この不規則な変動を精度良く再現している。

以下に、予報誤差の大きなケースについていくつか検討する。10月31日(図中矢印)の水位差の予報値が、

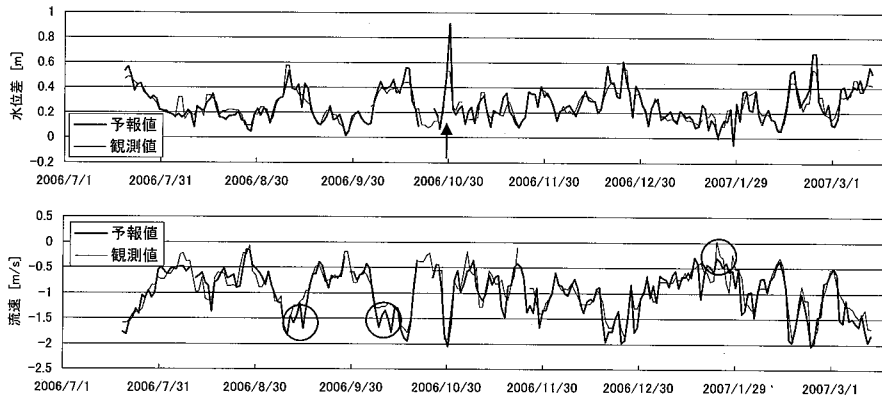


図-4 予報結果と観測結果 (水位差と St.R の水深 7m での流速)

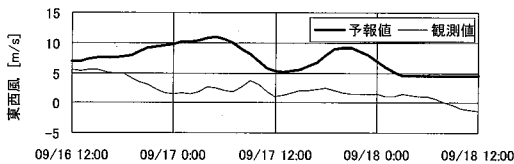


図-5 風の予報値と観測値 (2006 年 9 月 13 日～15 日)

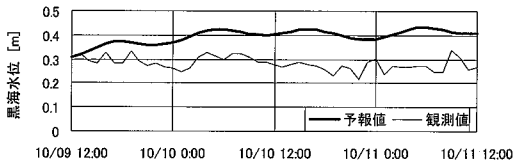


図-6 黒海水位の予報値と観測値 (2006 年 10 月 9 日～11 日)

観測値よりもかなり大きくなっている。この日は、10 m/s 以上の風が吹いていたため、風の吹寄せ効果により水位が大きく変動している。モデルでは吹寄せ効果は風速の 2 乗に比例するものとしたが、水位がある値を超えると、その影響による水位上昇の程度が低減するものと考えられる。特にマルマラ海側ではこの日、15 m/s の北風が約 20 時間吹きつづけている。モデルでは、風速 10 m/s と 15 m/s の水位差に与える影響は 2 倍以上違う。しかし、過去の観測結果をみると、それほど水位差の違いは現れていない。この現象はモデルを構築する際にも確認されているが、強風時に合わせて係数を調整すると、通常の風に対して過小評価する傾向となるため、モデルでは安全側の係数を採用した。したがって本モデルでは、水位差が 0.6 m を超えるような場合には、風の吹寄せ効果を過大に評価している。ただし、この時の流速値を見ると、水位差に比べて大きな誤差は生じていない。これは、水位差 50 cm 程度までは水位差にともなって流速が大きくなるが、それ以上の水位差になると、水位差に対する流速の変動が小さくなるためである(織田ら, 2005)。

流速の予報値を見ると、1 月 24 日に流れが逆向きに

なっているケースがあるが、観測値ではそうっていない。水位差が 0 に近くなると、密度界面が上昇し、底層の逆流層が表層近くまで上がる。この時流れは、水面勾配と密度勾配のバランスが崩れるため非常に不安定な状態にある。本システムに適用した流況予測モデルは、このような現象を考慮していないため、水位差がほぼ 0 になるような場合には、予報精度は低くなる傾向にある。しかし、本システムの主な目的は海上工事に支障をきたすような速い流れにならないことを予め確認することであり、この 0 付近の流速精度については問題としない。

9 月 16 日付近では、水位差、流速ともに、予報値が観測値よりも大きくなっている。図-5 に 9 月 16 日の東西風の予報値と観測値を示す。観測値によれば、12 時間後にはほとんど風が止んでいるのに対し、予報値は、約 10 m/s の風が吹く予報となっている。このように、風の前報値が大ききはずれた場合には、水位差の前報誤差が大きくなり、そのため流速の前報誤差も大きくなる。

また、10 月 9 日付近でも、予報値が観測値よりも大きくなっている。この時の風の前報精度は比較的良好であり、またマルマラ海側の水位についても良好な予報結果であったが、図-6 に示すように黒海の水位予報が過大となっていた。過去の観測結果によると、黒海側では風の影響による水位変化の特性が、ほぼ同じ風であっても日によって一定しない。これは、風の吹き始める前の黒海内の流況により、吹寄せ効果の特性が異なるためと考えられる。しかし、黒海内の流況を時々刻々把握することは困難なため、モデル化においては安全側の値となるよう、大きめの係数を採用している。

以上の様に、予測モデルの構築においては、安全側の値となるよう、各係数を大きめに設定しており、実際の運用においても誤差は流速が大きめの値となるように現れていることが確認された。次に、個々の予報成分の誤差について検討する。

4. 各成分の誤差評価

(1) 気圧の予報誤差

図-7は、気圧の予報値について、観測値と比較したものである。毎日12時発表の予報値について、24時間後の予報値と48時間後の予報値をそれぞれ観測値と比較した図を示す。誤差の標準偏差は、24時間後が1.5 hPa、48時間後が3.6 hPaであった。これらは水位の変動幅に変換すると1~3 cm程度の値であり、気圧については予報精度が高いことが分かる。48時間後の予報の方が若干誤差は大きくなるものの、気圧の予報値に含まれる誤差は小さいといえる。

(2) 風の子報誤差

図-8は、マルマラ海側の風の子報値について観測値と比較したものである。風については、気圧に比較してその時間的な変動が大きい。したがって、予報に時間的なずれがあると、各時間における一時的な誤差は大きくなる。しかし、水位変動への影響を考えた場合、多少の時間のずれよりも継続時間の方が重要である。したがってここでは、予報時間48時間の間の平均値について比較した。南北風については、観測値と予報値は、ほぼ1対1の関係にあることが分かる。一方で、東風は、観

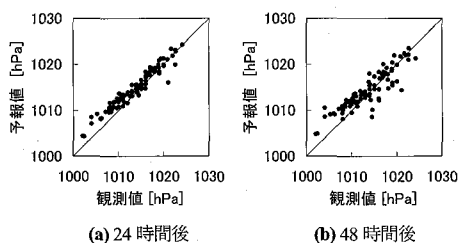


図-7 気圧の予報値と観測値の比較

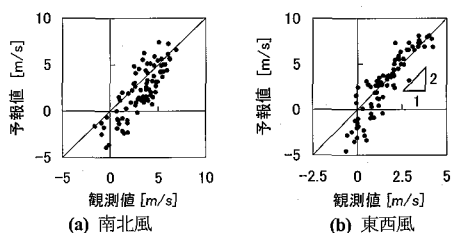


図-8 風の子報値と観測値の比較

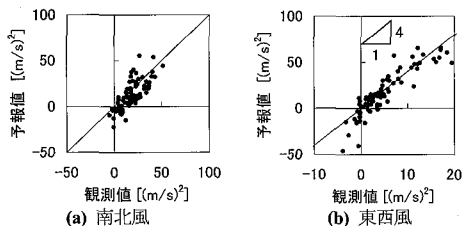


図-9 風速の2乗値の予報値と観測値の比較

測値が予報値よりも小さく、約半分程度の値となっている。これは、風の観測点が海峡に少し入った場所にあるため、地形的な影響で東西風の観測値が小さくなっているものと考えられる。なお、この影響については予測モデル内に取り込んでいる。誤差の標準偏差を計算すると、南北風は3.4 m/s、東西風は4.1 m/sとなった。ただし、風の影響は風速の2乗に比例すると考えられるため、風速の小さい時と大きい時では、誤差の影響が大きく違う。そこで、風速の2乗値の48時間平均について、図-8と同様に比較したものを図-9に示す。図-8では、ばらつきが風速によらずほぼ均一に分布しているのに対し、図-9では、風速が大きいほど誤差が大きくなることが分かる。したがって、風が強く、それにより水位が大きく変動する時ほど、予報の誤差が大きくなるため、予報値の評価において注意を要する。

(3) 水位の予測誤差

図-10に黒海側、図-11にマルマラ海側の水位について図-7と同様に24時間後、48時間後の予報値と観測値の比較を示す。誤差の標準偏差は黒海側でそれぞれ7.3 cmと8.6 cm、マルマラ海側で8.9 cmと10.2 cmであった。黒海側、マルマラ側ともに、傾きほぼ1の直線上にあることから、水位の予報値は妥当な値となっていることが分かる。また、気圧や風の子報値と同様に、24時間後よりも48時間後の方が精度は若干低下している。マルマラ海側の特徴として、水位が低い時の方が、誤差が大きくなる傾向にある。北風もしくは東風が強い時に水位が低下するが、その時は図-9に示した様に風の子報誤差の影響が大きくなるため、水位の予測精度が低下していると考えられる。

(4) 流速の子報誤差

流速の48時間予報の最大値について観測値と比較し

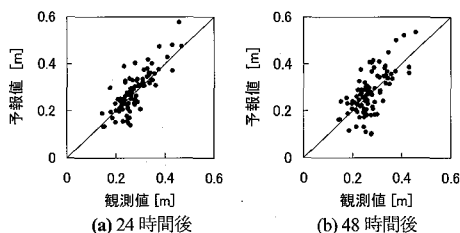


図-10 黒海側水位の予報値と観測値の比較

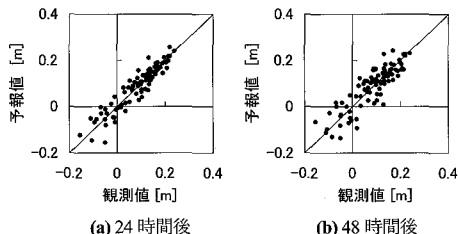
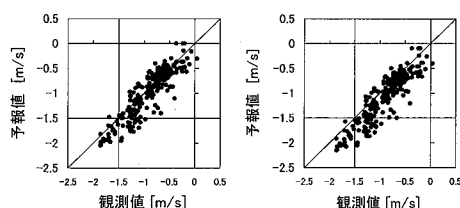


図-11 マルマラ海側水位の予報値と観測値の比較



(a) 誤差考慮なし (b) 誤差考慮あり

図-12 流速の予報値と観測値の比較

たものを、図-12(a)に示す。なお図-12(b)は、誤差を考慮して予報値を下方にシフトした場合の図であり、これについては後述する。流速が1.0 m/s以下の場合には、ほぼ1対1の直線になるが、1.5 m/s以上では、すべての予報値が観測値と同程度が大きくなっている。上述した様に、本システムは流速の誤差が安全側になるように各パラメタを調整しているが、この図からもその効果が読み取れる。

予報値のばらつきを意味する、各観測値での縦方向の分布幅を見ると、観測値の-1～1.5 m/sの間でばらつきが大きいことが分かる。これは、水位差の変動に対する流速の反応が水位差毎に違い、流速-1～1.5 m/s程度においてもっとも水位差に対して敏感に流速が変動するためである。前述したように、水位差がこれよりも大きくなると、水位差の増加に対して流速がそれほど大きくならないため、誤差も小さくなっている。

5. 函体沈設の可否判断への適用

沈設の可否は、函体曳航開始時に判断される。沈埋函沈設時の表層15 mの平均流速を、1.5 m/s以下と設定しているため、沈設作業中は流況がこれ以下になることを予報システムで確認して、沈設作業を開始する。2006年12月25日から28日にかけて、模擬函体を用いて、この沈設の可否判断を含めた沈設トレーニングを実施した。図-13は、その時の沈設可否判断時における予報値と、実際の観測値である。当初25日から函体を曳航する予定であり、当日の観測値は1.2 m/s程度と許容値を下まわっていたが、翌日、2.0 m/sまで流速が増大する予報であったため曳航を中止した。27日の予報で沈設可能となったため曳航を開始し、翌日28日に函体の沈設訓練を実施した。図中に示した実測値によれば、予報に基づいた可否判断は両者とも正しかったことが分かる。

上記のような沈設可否判断を、1日1回行い、実際の観測値と比較して正答率を求めたものを表-1に示す。これによれば、沈設可を判断したケースのうち、99.5%が実際に沈設可の流況であった。非常に複雑な流況変化をする当該水域において、この正答率は非常に高いと言える。しかし、沈設可の判断に対して、実際には不可

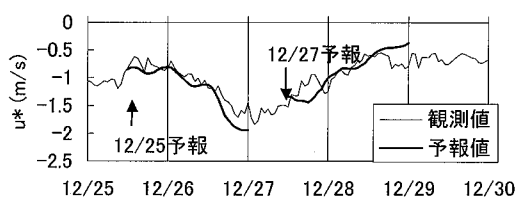


図-13 沈設訓練実施時の予報値と観測値の比較

表-1 予報値に基づいた可否判断の正答率

		予報による判断 誤差考慮なし		予報による判断 誤差考慮あり	
		沈設不可	沈設可	沈設不可	沈設可
観測結果	沈設可	20	191	31	180
	沈設不可	21	1	22	0
	合計	41	192	53	180
正答率		51.2%	99.5%	41.5%	100.0%

だった日がこの場合は1日あり、沈設を行う上ではこれを避ける必要がある。そこで、流況の予測誤差として安全側に0.1 m/sを見込んだ場合の結果を、図-12(b)および表-1に示す。沈設不可の正答率が低下し、施工効率は下がるものの、沈設可の判断は全て正しいことになり、施工の安全性が確保されることが分かる。

6. おわりに

これまでに開発した流況予報システムを現地にて運用し、その結果にしたがって予報精度の評価をすることにより、以下のような特性が分かった。

- ・風速10 m/s以上の風が予報される場合には、その影響を過大評価する傾向にあるが、流速の予報値への影響は小さい。
- ・風の継続時間が長いと、水位変動を過大に評価する傾向がある。
- ・流れの予報値は、特に流速1 m/s以上において、大きめの値を示すため可否判断においては安全側となる。
- ・適切な予測誤差を見込むことで、沈設の安全性をより確保することが可能である。

本システムは沈設を支援する上で、非常に高い精度を有しているが、実際の沈設可否判断においては、上述の特性を考慮した上でより安全側の判断をする必要がある。

参考文献

- 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(2005):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.
- 織田幸伸・伊藤一教(2007a):二層流場の動的変動を考慮した流況予測手法の開発, 沿岸域学会誌, Vol. 19, No. 4, pp. 13-24.
- 織田幸伸・伊藤一教・上野成三・小山文男・栄枝秀樹(2007b):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予測モデルのシステム化と精度検証, 海洋開発論文集, 第23巻, 印刷中.