

高潮予測モデルを統合した橋桁の危険度推定モデルの構築とその検証

長岡技術科学大学大学院

篠地 叡生

長岡技術科学大学

正会員

中村 文則

長岡技術科学大学

フェロー

下村 匠

1. はじめに

近年、台風に伴って発生する高潮によって、沿岸部の構造物が甚大な被害を受ける事例が多く報告されている。米国で発生した Hurricane Ivan(2004), Hurricane Katrina(2005)では、Mississippi 州の Biloxi 湾に架かる US-90 Biloxi Bay Bridge をはじめ、メキシコ湾岸に位置する橋梁の多くが落橋し、高潮災害の構造物に及ぼす危険性が明らかとなっている。

橋桁に作用する高潮波力に関する研究は、Douglass ら(2006, 2008)や Sheppard and Marin(2009)によって、被災地の現地観測と室内実験による簡易式が報告されている。Xiao ら(2010)は、VOF 法による数値解析的な波力の検討を行い、詳細な落橋メカニズムを明らかにしている。しかしながら、それらの多くは最大高潮波力を対象とした研究であり、桁の流出荷重に着目して橋桁の危険度を推定した事例は少ない。

本研究では、過去に発生した高潮被害を対象に、高潮予測モデルを統合した橋桁の危険度推定モデルを構築し、その結果について検証を行った。

2. 高潮および橋梁被害の事例

2.1. 対象とした高潮事例

対象とした高潮は、2005 年 8 月末に米国で発生した Hurricane Katrina である。Katrina はバハマ南東で発生し、アメリカ南部に上陸したハリケーンである。勢力のピークは、8 月 28 日 18:00(UTC)頃に、最低中心気圧 902hPa、最大風速 77m/s であったことが、NOAA(2005)によって報告されている。Katrina に伴う高潮発生時の様子を図-1に示す。この高潮は、Louisiana 州、Mississippi 州、Alabama 州など広域にわたって被害をもたらし、New Orleans や Biloxi などの沿岸部の都市では住宅街の氾濫や浸水に加えて、沿岸部の橋桁の多くが流出に至っている。

2.2. 橋梁の被害事例

図-2 は、Mississippi 州の Biloxi 湾に架かる US-90 Biloxi Bay Bridge の被害状況を示したものである。この橋梁は、Biloxi 市の Biloxi 湾上に架かる橋長 2.7km の可動橋であり、単純支持 T 桁断面の構造形式である。Biloxi Bay Bridge の断面図を図-3 に示す。橋梁全体で 125 の桁から構成される橋梁であり、その中の桁高がおよそ 22ft (約



図-1 Katrina による高潮発生時の様子



図-2 Katrina による橋梁被害

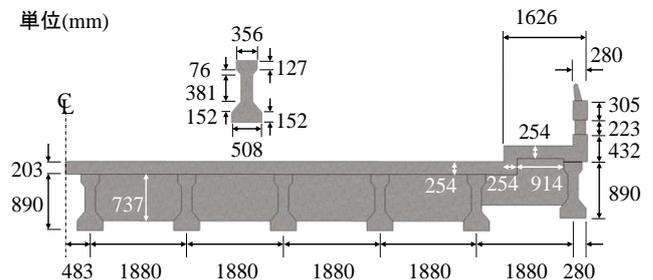


図-3 Biloxi Bay Bridge の断面図

6.7m) 以下の 100 の桁が、Katrina に伴う高潮によって流出に至ったことが、Douglass ら(2006)の調査によって明らかとなっている。

3. 高潮波力が作用する橋桁の危険度推定モデル

3.1. 高潮予測モデル

高潮予測モデルは、Warner ら(2008)が開発した大気海洋波浪結合モデル COAWST (Coupling Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport Modeling System)である。図-4 は、COAWST の全体構成を示したものである。図に示すように、COAWST は領域気象モデル WRF、海洋モデル ROMS、波浪推算モデル SWAN を結合したモデルであり、ハリケーンを対象とした追算の際、海面温度や波高の追算精度が向上し、高潮現象を高精度にモデル化できることが報告されている(Warner ら, 2010)。

WRFは、米国気象センター(NCAR)やペンシルバニア州立大学などの組織が共同開発した非静力学モデルである。地形や境界における風況、気圧などを設定することで、風況、気圧、大気・海面温度、降雨量などの平面的な分布を時系列で計算することが可能なモデルである。

ROMSは、プリミティブ方程式を支配方程式とする準3次元海洋モデルである。海底地形や潮汐力、海面温度、境界における海上風などを設定し、静水圧・ブシネスク近似を用いてレイノルズ平均したナビエ・ストークス方程式を解くことで、天文潮位や高潮偏差、流速を計算することができるものである。

SWANは、デルフト工科大学で開発された、深海域から極浅海域まで対応するスペクトル法を用いた第3世代波浪モデルである。波作用平衡式を基礎方程式とした波浪計算によって、風による波の発達、減衰、非線形干渉の物理過程を含めた予測が可能なモデルである。

以上のモデルを統合し、各モデルの計算結果を相互に利用することで高潮の予測計算を行った。

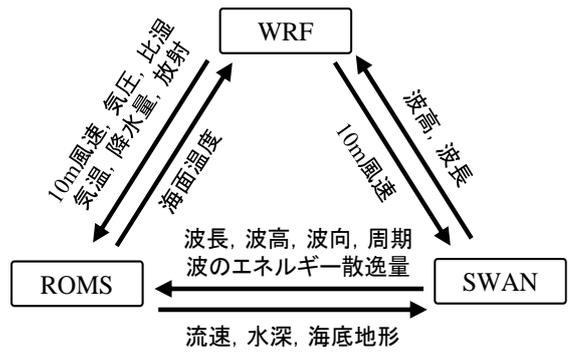


図-4 高潮予測モデルの全体構成

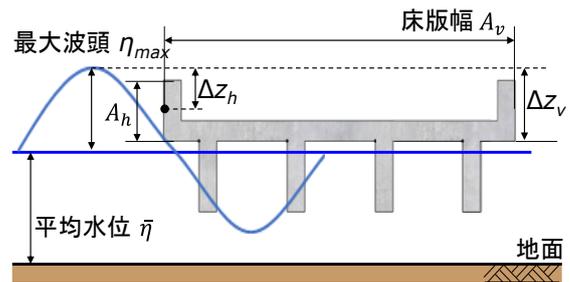


図-5 波力推定式のご概念図

3.2. 橋桁に作用する波力の推定方法

橋桁に作用する波力については、Douglass ら(2006)によって提案された式(1)、式(2)を用いて推定を行った。

$$F_h = [1 + C_r(N - 1)]C_{h-va}\gamma(\Delta z_h)A_h \quad (1)$$

$$F_v = C_{v-va}\gamma(\Delta z_v)A_v \quad (2)$$

ここで、 F_h は水平波力、 F_v は鉛直波力、 C_r は水平荷重の減少係数(推奨値は0.4)、 N は桁数、 C_{h-va} 、 C_{v-va} は経験係数(推奨値は1.0)、 A_h は床版の垂直投影高さ、 Δz_h は最大波頭と A_h の重心の標高差、 Δz_v は最大波頭と橋桁下部の標高差、 A_v は床版幅、 γ は海水の比重で約10.06 kN/cm³である。図-5に、Douglass ら(2006)の波力推定式のご概念図を示す。

橋桁の危険度の判定は、鉛直波力が桁の自重を上回った際に流出が発生したと仮定して行った。

3.3. 計算および境界条件

高潮予測モデルの計算領域を図-6に示す。第1領域は、橋梁被害が多く報告されたLouisiana州からFlorida州までのメキシコ湾沿岸であり、第2領域は波力推定を行う橋梁周辺である。計算期間は、KatrinaがLouisianaに上陸する2日前の2005年8月27日午前0時から、5日後の9月1日午前0時までとした。高潮予測計算の計算条件を整理したものを表-1に示す。波力推定モデルの係数については、Douglass ら(2006)の既往研究の値を参考に設定した。

橋桁の危険度推定の対象とした橋梁は、Biloxi市に位

表-1 高潮予測計算の計算条件

		第1領域	第2領域
WRF	水平格子間隔	9 km	3 km
	水平格子数	100×100	160×160
	時間間隔	30	10
	鉛直層数	40	
	雲微物理	WSM3	
	放射(短波)	Dudhia	
	放射(長波)	RRTM	
	大気境界層	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE	
	地表面	United Noah land-surface model	
	初期値・境界値	NCEP-FNLデータ	
ROMS	水平格子間隔	-	3 km
	水平格子数	-	155×77
	鉛直層数	15	
	時間間隔	-	3 s
	初期値	HYCOM + NCODA Global 1/12°	
	境界値	HYCOM + NCODA Global 1/12°	
SWAN	地形データ	SRTM30 plus	
	水平格子間隔	-	3 km
	水平格子数	-	155×77
	地形データ	SRTM30 plus	
	風データ	NARR 32km	
	座標系	直線座標系	
結合	波の発達モデル	Komenモデル	
	時間間隔	300 s	

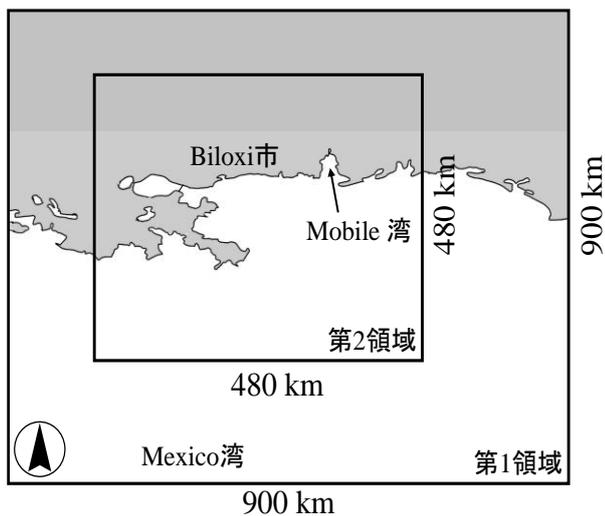


図-6 高潮予測計算の計算領域

表-2 波力推定計算の対象とした橋梁情報

	Biloxi Bay Bridge	Tensaw River Bridge
桁長	15.8 m	14.2 m (推定値)
床版の幅	10.16 m	13 m
桁数	6	6 (推定値)
桁下の垂直空間	6.1 m	8.0 m
コンクリートの体積	3.94 m ³	4.44 m ³ (推定値)

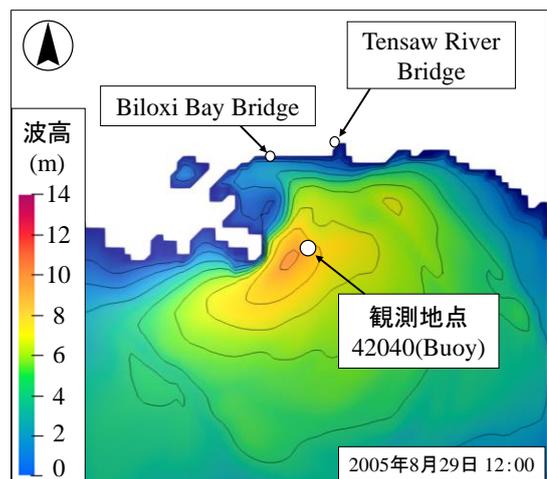
置する Biloxi Bay Bridge と Alabama 州に位置する Tensaw River Bridge である。橋桁の情報を整理したものを表-2に示す。表の Tensaw River Bridge の桁長、床版幅、桁高は、National Bridge Inventory の情報を参考にした。桁数、コンクリート体積については、断面図の入手が困難であったため、定期点検記録と衛星写真から推定した値である。

4. 計算結果および考察

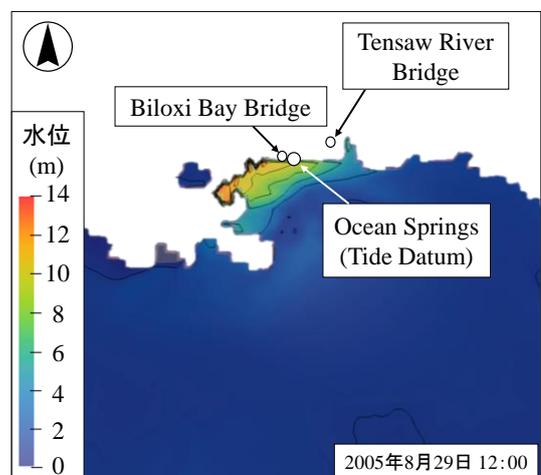
4.1. 高潮の予測結果の検証

高潮予測モデルによって高潮を予測した計算結果を図-7に示す。図は、Biloxi Bay Bridge において最大水位となった8月29日12:00の計算結果である。図(a)が波高、図(b)が水位を表している。図中の白丸印は、橋梁位置と、波高・水位の観測点である。図に示すように、Biloxi Bay Bridge 付近では、波高が3.81m、水位が6.86mとなっている。

計算結果の妥当性を検証するために、米国海洋大気庁(NOAA)によって観測された波高と水位との比較を行った。波高と高潮水位の観測結果と計算結果の比較を図-8に示す。波高の観測値は National Buoy の 42040 地点を、水位の観測値は Tide Datum の Ocean Springs のデータを用いた。図に示すように、波高、水位ともに、計算結果は観測結果と概ね一致していることが分かる。上の図の波高のピークが少しずれているのは、格子間隔が比較的大きいためであると考えられる。



(a) 波高分布



(b) 水位分布

図-7 高潮の計算結果

4.2. 橋桁の被害予測

図-9は、Biloxi Bay Bridge と Tensaw River Bridge の断面 1m あたりに作用する鉛直波力の計算結果を示したものである。図の赤線は、橋桁の自重の算出結果を示したものである。橋桁の自重は、橋桁断面積とコンクリートの密度から算出した。

図(a)の Biloxi Bay Bridge の計算結果では、8月29日12:00に橋桁に作用する鉛直波力が584.3kN/mと最大値となっており、橋桁の自重92.8kN/mを上回っていることがわかる。高潮の来襲による波浪の鉛直波力が、橋桁の自重を上回った時間は、水位が最大となる約1時間前の29日11:00である。橋桁は、この時間以降に波浪作用によって生じた鉛直波力で持ち上がり、橋桁が移動したと考えられる。この結果は既往研究の Douglass ら(2006)の結果ともおおむね一致している。

以上の計算結果を利用し、Biloxi Bay Bridge の流出を防止するための構造形式について検討を行った。高潮来襲時の橋桁では、流出した橋梁の床版厚さが車道部分で

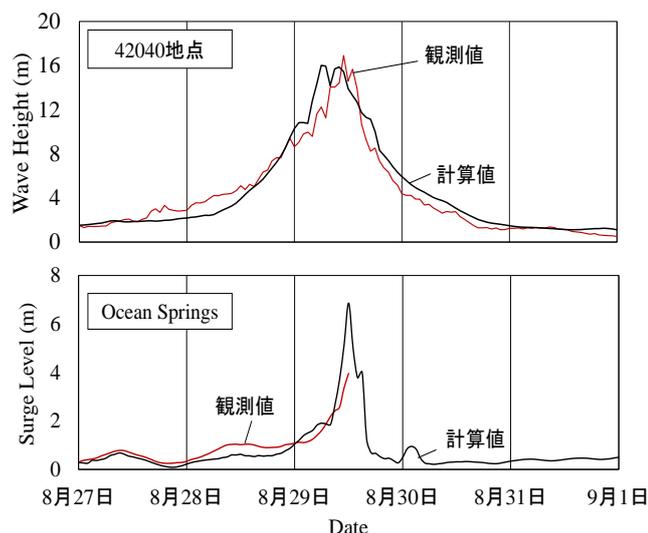


図-8 波高と水位の比較

203mm(8 in), 歩道部分で 254mm(10 in)であり, 自重および桁高が不足していたと考えられる。そのため, 計算結果から得られた最大鉛直波力と水位を参考に, 橋桁の床版厚さを 400mm(4in)増加させるとともに, 桁高を 6.4m から 10.0m として再計算を実施した。その結果, 自重の算出結果が 118.9kN/m, 最大鉛直波力が 116kN/m となり, 橋桁が流出しない判定となった。

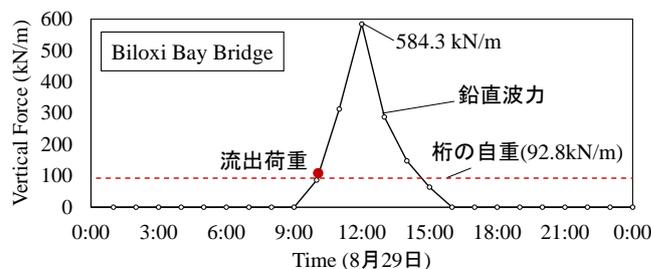
図(b)は, Tensaw River Bridge に作用する鉛直波力を示した計算結果である。図に示すように, 8月29日13:00に橋桁に作用する鉛直波力が 99.0kN/m となっており, その後, 19:00に再び波力が作用していることがわかる。橋桁の自重 104.4kN/m と最大鉛直波力を比較した場合は, 作用した波力が 5.6kN/m だけ小さくなっており, 橋桁の流出(移動)が生じない結果であった。実際に, この橋梁は, 高潮の流出の被害を受けていないことが報告されており, それと同様の結果である。

5. 結論

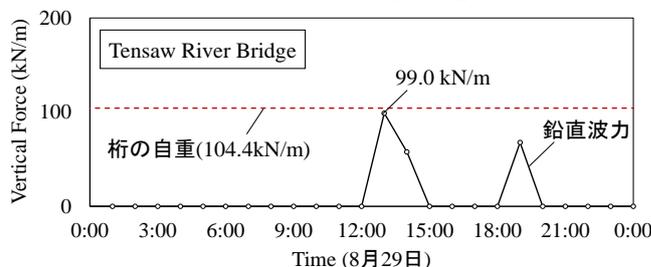
高潮予測モデルを統合した橋桁の危険度推定モデルの構築を行った。その結果, 高潮予測モデルによる波高と水位の計算結果は観測結果と概ね一致していることが示された。橋桁の波力による危険度の推定結果と報告されている被害事例が一致することから, 本モデルが橋桁の危険度を推定できていることが明らかとなった。

謝辞

本研究は, 日本学術振興会科学研究費(挑戦的研究(萌芽))(課題番号:20K21054)「次世代の社会基盤構造物の維持管理のための危険度総合評価システムの開発」(基盤研究C, 研究代表者: 神田佳一, 課題番号: 16K06524)の一部として行ったものである。ここに, 記して謝意を表します。



(a) Biloxi Bay Bridge



(b) Tensaw River Bridge

図-9 鉛直波力の計算結果

参考文献

- 1) Douglass, S. L., Chen, Q. J., & Olsen, J. M. (2006). Wave Forces on Bridge Decks Prepared for. Transportation, April.
- 2) Douglass, S. L., Scott L, Krolak, & Joe. (2008). Highways in the Coastal Environment Second Edition.
- 3) Sheppard, D. M., & Marin, J. (2009). FINAL REPORT WAVE LOADING ON BRIDGE DECKS FDOT NUMBER: BD545-58.
- 4) Xiao, H. (2009). Numerical Simulation of Dynamic Wave Force on Coastal Structures under Extreme Storm Surge Conditions.
- 5) NOAA, Center for Operational Oceanographic Products and Services (2005). Preliminary Report Hurricane Katrina Storm Tide Summary. 20
- 6) Warner, J. C., Sherwood, C. R., Signell, R. P., Harris, C. K., & Arango, H. G. (2008). Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. Computers and Geosciences, Vol.34, No.10, pp.1284-1306.
- 7) Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., & Zambon, J. B. (2010). Development of a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) Modeling System. Ocean Modelling, Vol.35, No.3, pp.230-244.
- 8) National Bridge Inventory Data (<https://bridgereports.com/>)
- 9) NOAA, National Data Buoy Center (<http://www.ndbc.noaa.gov/>)
- 10) NOAA, Tides & Currents, (<https://tidesandcurrents.noaa.gov/>)