

橋梁上部工に作用する津波波力特性および 支承応答に関する解析的考察

奈良崎泰弘¹・田崎賢治²・佐々木達生³

¹正会員 大日本コンサルタント（株） 復興・防災推進部（〒550-0014 大阪府西区北堀江1-22-19）

²正会員 工博 大日本コンサルタント(株) 復興・防災推進部
(〒550-0014 大阪府西区北堀江1-22-19)

³正会員 大日本コンサルタント(株) 技術統括部(〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1)

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、東北地方を初め東日本太平洋沿岸部において多くの橋梁が上部工流出等の被害を受けた。橋梁に作用する津波波力については、2004年に発生したスマトラ沖地震の津波による橋梁の流出被害を契機としてその要因の解明に向けた研究が進められていたが^(例えば1)~4)、東北地方における数多くの橋梁流出被害とそれによる影響の大きさを受け、各方面での研究活動はさらに加速しており^(例えば5)~9)、また今後想定される津波への対策の必要性も高い。

橋梁上部工流出の被害は橋梁により多様であるが、流出の状況および支承部の損傷状況から、その要因は水平波力、鉛直波力、およびそれらに伴う回転挙動に大別されると考える。しかしながら、流出被害の有無、流出形態を分ける要因、メカニズムについては未だ不明な点が多く残される。

本研究の目的は、上記の橋梁上部工流出の3形態に着目し、津波の特性に応じた波力の特性や規模、流出に対する支承部の抵抗力からこれらと各流出形態との関係性を分析することである。津波波力と支承部の抵抗力はすなわち津波による外力と津波に対する耐力であり、本研究では前者については数値波

動水槽による流体解析により算出し、後者については支承の設計反力を評価値とした。なお、対象とする橋梁上部工およびその重量は一般的な形状を仮想的に用いる。支承の設計反力については平成8年の道路橋示方書改訂においてレベル2地震動に対する設計の導入により支承の設計反力が大きく変更されているため平成2年道路橋示方書（以降H2道示と称する）以前と平成8年道路橋示方書（以降H8道示と称する）以降の両者の設計震度について設定した。

2. 検討条件

(1) 使用ソフトおよび解析モデル

本研究における解析手法は CADMAS-SURF/3D¹⁰⁾を用いた差分法とした。なお、鉛直波力の算出においては桁下に閉じ込められる空気が影響すると思われるが、CADMAS-SURF/3D における「空気圧計算モデル」により近似的に考慮した。

(2) 解析モデル

解析モデル全体図を図-1に示す。数値水槽の背面境界を透過条件にするとともに造波位置から橋梁前面まで十分な距離をとって反射波の影響がないように留意した。

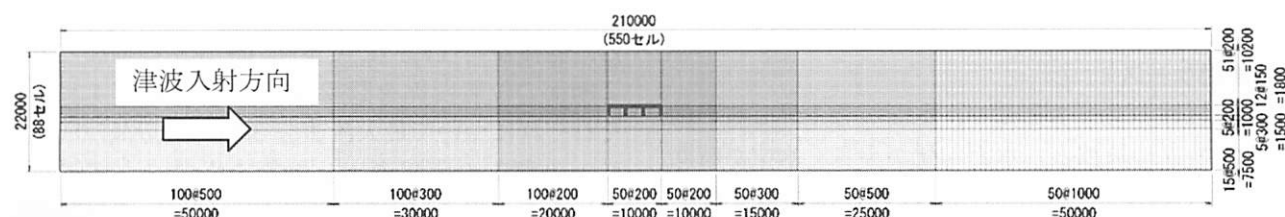
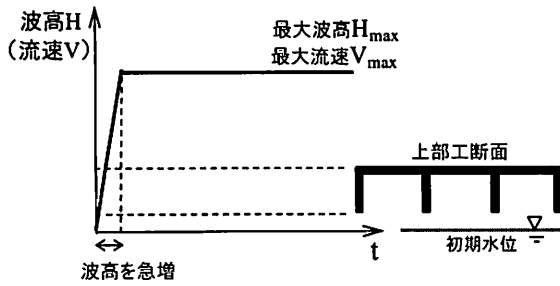
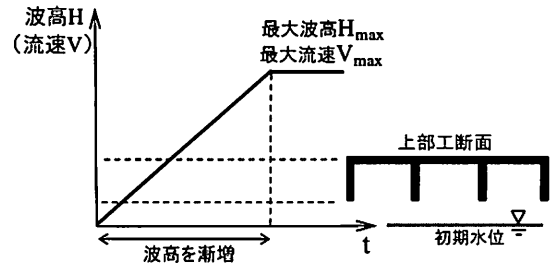


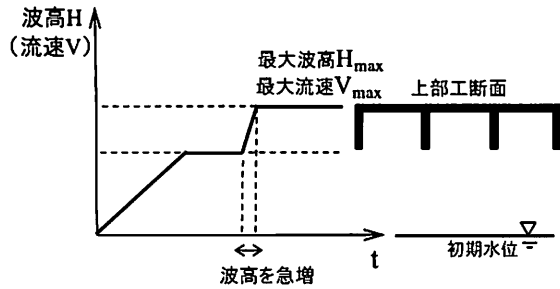
図-1 解析モデル全体図



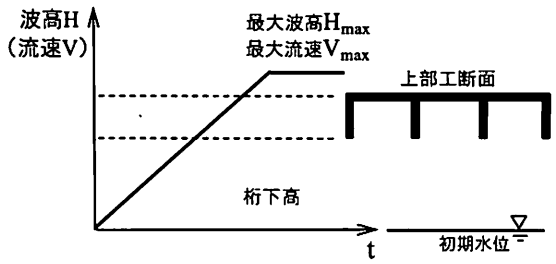
(a) Case B-1



(c) Case G-1



(b) Case B-2



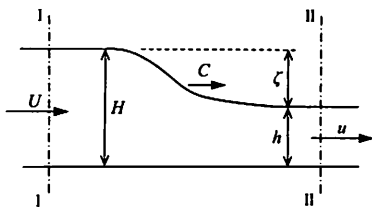
(d) Case G-2

図-2 各津波特性における造波波形

(3) 造波方法

解析において橋梁に衝突させる津波の波高および流速は福井ら¹¹⁾による式(1)に基づいて設定した。これは水平床上の津波の伝播における流速と波高および初期水位の関係であり、数値波動水槽においてもこの関係性がよく再現できることが確認されている。

$$U = \frac{C\zeta}{H} \sqrt{\frac{gH(H+h)}{2H(H-\eta\zeta)}} \quad (1)$$



なお、この式に基づいた造波をした場合、波高の増加に伴い一定の割合で流速も増加することとなる。実際に橋梁に作用する津波の特性は広域的・平面的な影響を受け、必ずしもこの関係を満たすとは限らないが、ここでは津波特性の制御の便を優先した。

(4) 検討ケース

津波特性のケースとして、水面が急上昇し波の前面が切り立つ段波と、水面勾配が小さく水位が時間をかけて増加するような波（以降、漸増波と称する）を対象とし、さらに式(1)により波高と流速が比

表-1 津波特性ケース

(a) 段波の津波特性

Case	津波形状	段波波高
B-1	段波	桁高に対して十分高い
B-2		桁高程度

(b) 漸増波の津波特性

Case	津波形状	越流時流速
G-1	漸増波	遅い
G-2		速い

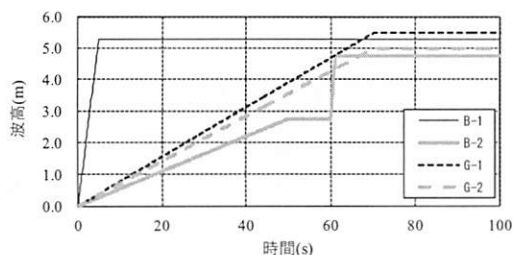
表-2 解析ケース

津波特性	4ケース
最大流速	3.0m/s, 5.0m/s, 7.0m/s
上部工断面	張出し 有 or 無
計	24ケース

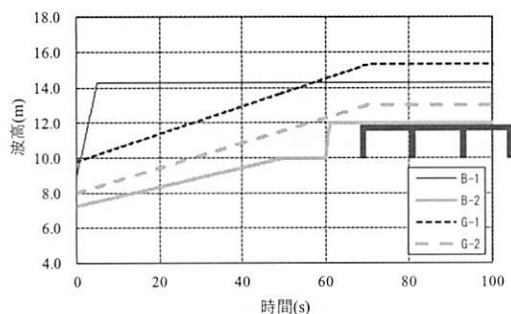
例して増加する場合の波力特性を踏まえて表-1 の4ケースとした。この波力特性とは段波による波力は波高が大きく影響すること、漸増波による波力には越流時の流速が小さいほど桁下における圧力低下が顕著になり上向き鉛直波力が小さくなることである。各津波特性について波高（流速）の増加と上部工断面の位置関係を図-2 に示す。これら4ケースそれぞれについて最大流速を3.0m/s, 5.0m/s, 7.0m/sとし、上部工の床版張出しが無い場合（上部工断面①）と有る場合（上部工断面②）について検討した。以上より検討ケースは表-2 の全24ケースとなる。

表-3 各ケースの造波条件

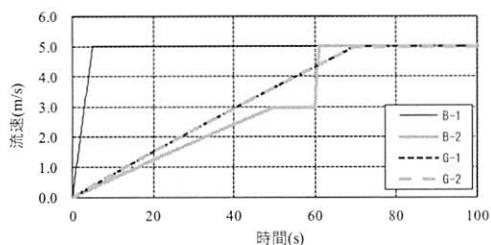
最大流速 V_{max}	津波特性	初期水位	造波波高 H_{max}	越流時流速
3.0	B-1	9.00	3.06	-
	B-2	9.00	3.06	-
	G-1	9.87	3.20	2.00
	G-2	9.00	3.06	3.00
5.0	B-1	9.00	5.27	-
	B-2	7.24	4.76	-
	G-1	9.81	5.48	2.00
	G-2	8.01	4.98	4.00
7.0	B-1	9.00	7.54	-
	B-2	5.83	6.17	-
	G-1	9.77	7.84	2.00
	G-2	7.93	7.11	4.00



(a) 波高



(b) 波高 (初期水位との合計)

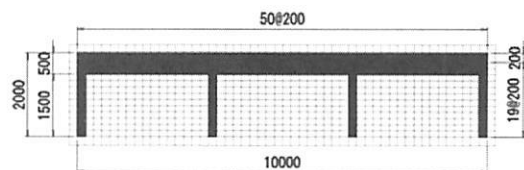


(c) 流速

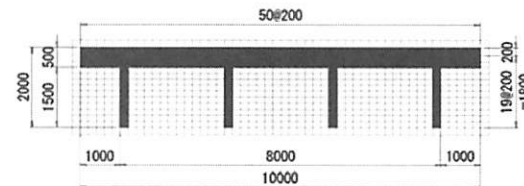
図-3 造波波形 (最大流速 5.0m/s)

(5) 造波条件

表-3 に各ケースの造波条件、図-3 に最大流速 5.0m/s のケースを例として造波波形を示す。ここで、桁下から河床までの高さは 10.0m とした。B-1 については初期水位を桁下から 1.0m 下方とし、段波の下側が橋梁に衝突するようにした。B-2 につい



(a) 上部工断面①



(b) 上部工断面②

図-4 上部工断面のモデル化

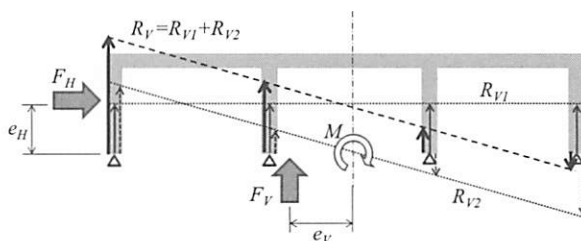


図-5 支承反力の算出

ては最大流速が所定値でかつ最大波高が路面の高さとなるように初期水位を調整し、桁下高までは波高を 50 秒かけて漸増させ、波高が一定の時間を 10 秒間設けたのちに、桁高 (=2.0m) 分の段波を造波した。G-1 については最大流速が所定の値としながら越流時 (水位が路面に達する時) の流速が 2.0m/s となるように初期水位を調整した。また G-2 についても同様に、初期水位時の越流時の流速を 3.0m/s (最大流速 3.0m/s のケース) または 4.0m/s (最大流速 5.0m/s, 7.0m/s のケース) とした。

(6) 上部工断面

図-4 に上部工断面形状を示す。一般的な鋼 4 主桁橋を想定し、幅員 10.0m、上部工全高 2.0m とした。床版張出しがある断面は張出し長を 1.0m とした。

(7) 波力応答値および支承反力の集計

波力の集計は上部工全体に作用する水平反力 F_H 、鉛直波力 F_V およびそれらに伴う回転モーメントにより支承に生じる上向き支承鉛直反力 R_V とする。支承鉛直反力については図-5 の通り、桁下端中央部回りの回転モーメントによる鉛直反力と鉛直波力による鉛直反力を合計した。支承を回転自由として考えた場合、各支承反力は式(2)で表される。

$$R_{Vi} = R_{V1} + R_{V2i}$$

$$R_{V1} = F_V / n \quad (2)$$

$$R_{V2i} = \frac{M}{\sum x_i^2} \cdot x_i = \frac{F_H \cdot e_H + F_V \cdot e_V}{\sum x_i^2} \cdot x_i$$

ここに、
 R_{Vi} : 各支承に作用する鉛直反力
 R_{V1}, R_{V2i} : 鉛直波力による鉛直反力、回転による鉛直反力
 F_H, F_V : 水平波力、鉛直波力
 M : 波力による回転モーメント
 n : 支承の基数
 e_H, e_V : 水平波力、鉛直波力の偏心距離
 x_i : 各支承の支承中心からの距離

(8) 支承部の流出抵抗力

支承部の流出抵抗力は1支承線全体の水平抵抗力、鉛直抵抗力および支承1基の鉛直抵抗力について算出し、それぞれ水平波力 F_H 、鉛直波力 F_V 、支承鉛直反力 R_V に対応する抵抗力である。鉛直抵抗力は橋梁上部工の自重および1支承線全体の鉛直抵抗力の合計である。橋梁上部工の自重は一般的な値から120kN/mとし、各抵抗力はH2道示およびH8道示以降の道路橋示方書を参考に表-4の通り設定した。なお、これらは許容応力度法による設計値であり、実際の支承の破断耐力はより大きいと考えられる。

3. 解析結果

解析結果として最大流速 5.0m/s の各津波特性における越流時の水面形状を図-6 に示す。B-1,B-2 については橋梁前面において水位が路面上方に盛り上がり、G-1,G-2 においては橋梁前面の水位はほぼ路面高と同程度である。また、橋梁背面については B-1,B-2 では水が衝突していないのに対し、G-1,G-2 では橋梁背面の水位が橋梁背面に沿って上昇していることが確認できる。B-1 と B-2 の差異は橋梁前面の波高である。G-1 と G-2 の差異は越流時の流速であるが、この差異により浸水時の流速が遅い G-1 においては橋梁背面の水面が比較的静穏であり、水位はほぼ路面高に達している。一方で G-2 における橋梁背面の水面は G-1 に比してに乱れており、水位は路面高より若干低い。

次に、最大流速 5.0m/s のときの応答波形（水平・鉛直波力およびモーメント）を図-7、各支承反力を図-8 に示す。まず水平波力については B-1,B-2 では衝突時に波力のピークが確認されるのに対し、G-1,G-2 ではピークが確認されない。また、B-1,B-2 については波力のピーク値に差があるのに対し、G-1,G-2 については波力の最大値に大きな差がない。

鉛直波力については、B-1,B-2 においては水平波力同様に波力のピークが確認される。G-1, G-2 に

表-4 支承抵抗力の評価値（死荷重比率）

		H2道示以前	H8道示以降	変位制限構造
水平	基準値	0.10~0.30	1.5~2.0	3・kh・Rd
	採用値	0.20	1.50	0.60
鉛直	基準値	0.10	0.30	-
	採用値	0.10	0.30	-

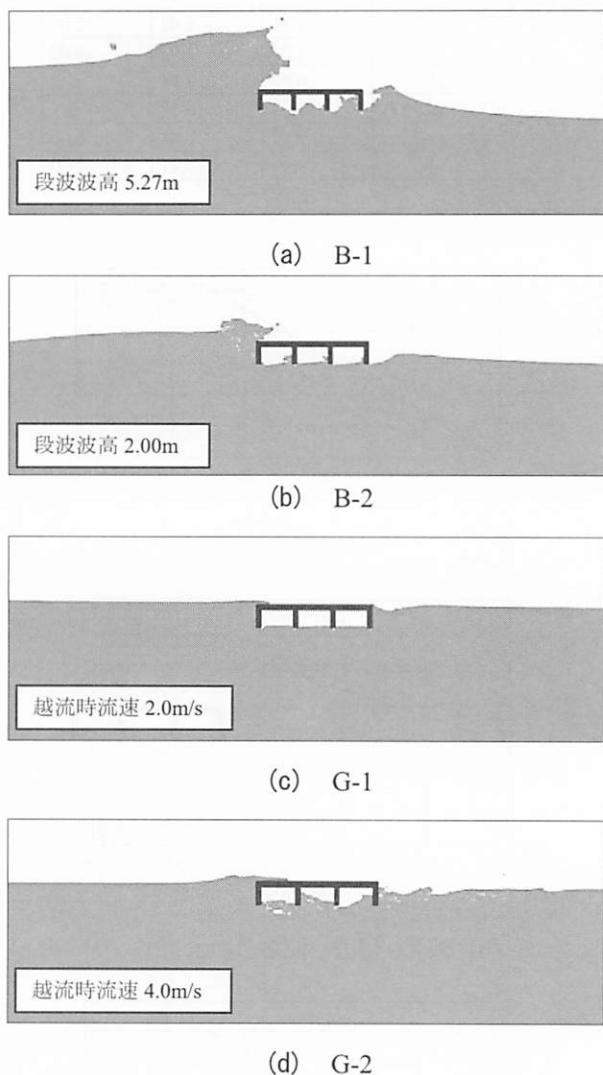
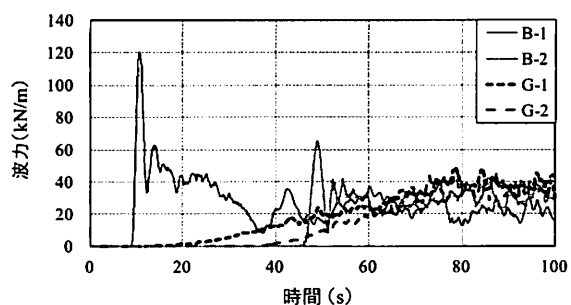


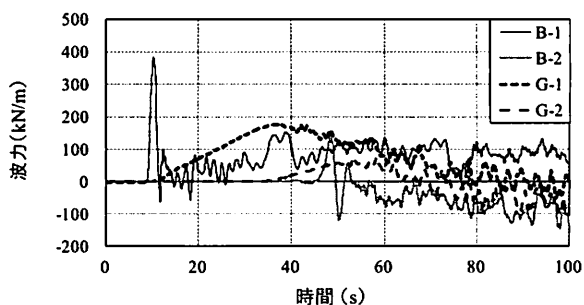
図-6 各津波特性の浸水時水面形状
（最大流速 5.0m/s、上部工断面①）

についても波力のピークが確認され、ピーク値は G-1 の方が大きい。

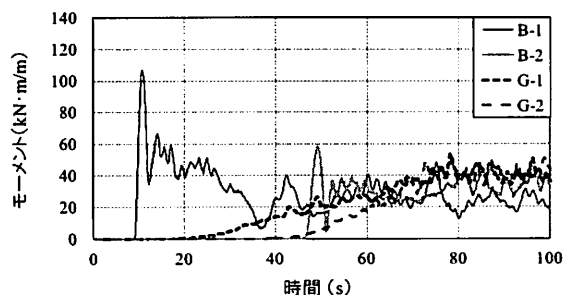
モーメントについては、水平波力によるモーメントは水平波力と同様の傾向である。鉛直波力によるモーメントは波力がピークとなる時点についてはモーメントは負の値となり、それ以外では概ねモーメントは正の値となる。また、鉛直波力のピーク値は G-1,G-2 で大きな差があるが、正のモーメントのピーク値については両者に大きな差がなく、G-2 の方が波力の重心が橋梁中央から外れているといえる。



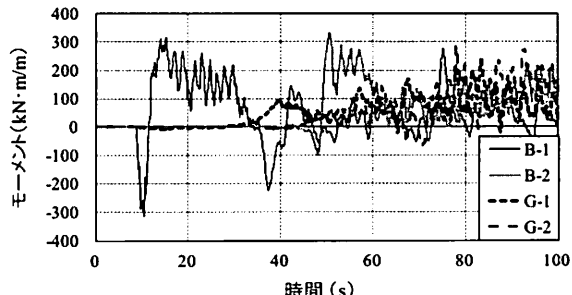
(a) 水平波力



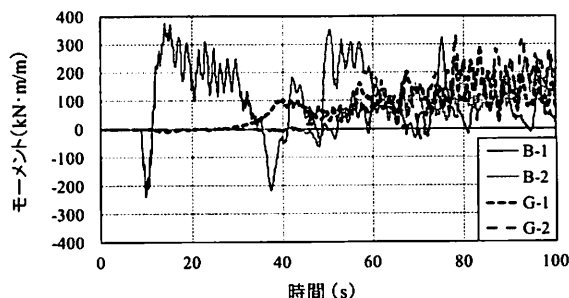
(b) 鉛直波力



(c) 水平波力による桁下端中央回りモーメント



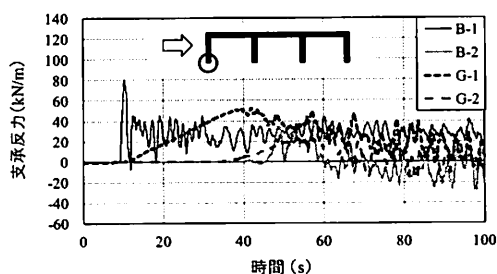
(d) 鉛直波力による桁下端中央回りモーメント



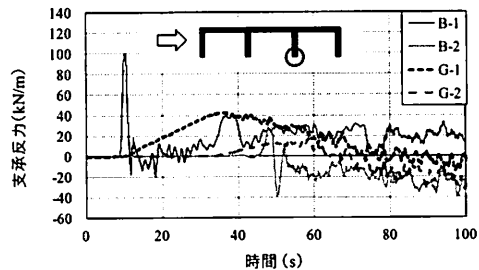
(e) 桁下端中央回りモーメントの合計

※各モーメントは橋梁前面側の支承に
上向き鉛直反力が作用する向きを正とする。

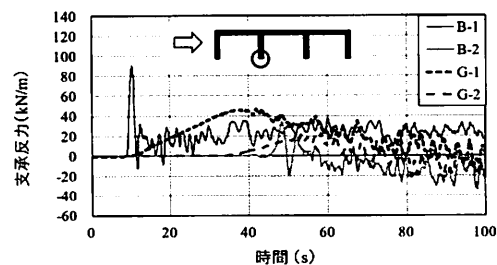
図-7 上部工に作用する波力およびモーメント (最大流速 5.0m/s, 上部工断面①)



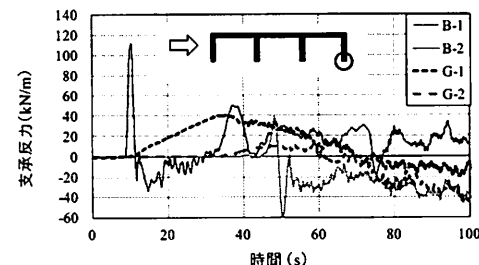
(a) 前面から1番目



(c) 前面から3番目

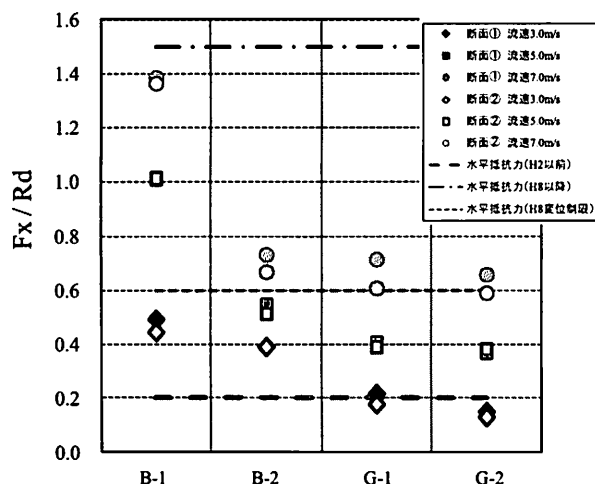


(b) 前面から2番目

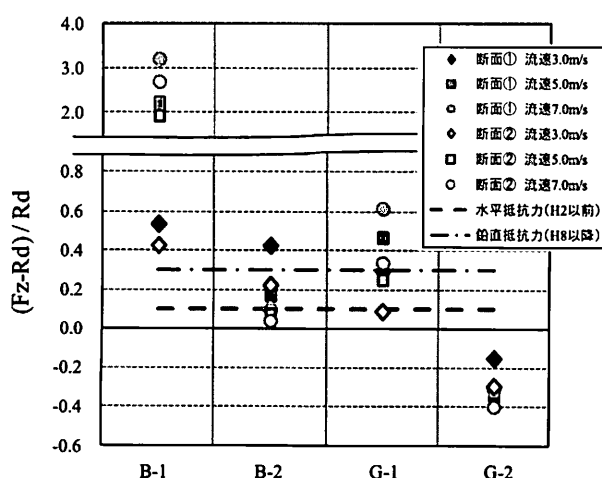


(d) 前面から4番目

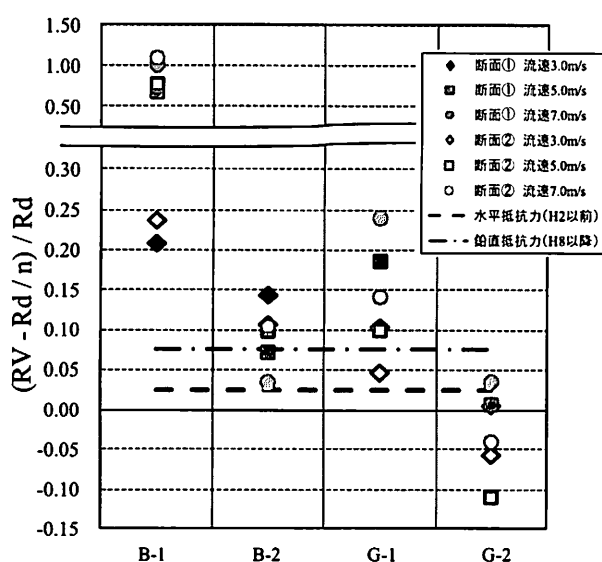
図-8 各支承の反力 (最大流速 5.0m/s, 上部工断面①)



(a) 水平波力



(b) 鉛直波力



(c) 支承鉛直反力

図-9 波力および支承反力と各抵抗力の比較

また、モーメントの合計値については鉛直波力によるモーメントと同様の傾向であり、水平波力によるモーメントに比して鉛直波力によるモーメントの影響が支配的であることがわかる。

4. 支承応答値と抵抗力の比較

図-9 に各解析ケースにおける波力と支承部の抵抗力の比較結果を示す。なお、水平波力については死荷重 R_d で除した値、鉛直波力および支承反力については死荷重分を除いた値を死荷重で除した値である。このとき、支承反力については死荷重が各支承に均等に作用しているものとしている。

まず水平波力に対しては流速 3.0m/s の漸増波を除くほとんど全てのケースで H2 道示以前の支承抵抗力を超過する結果となった。また、流速 7.0m/s の全てのケースと流速 5.0m/s のケース B-1 については変位制限構造の抵抗力も超過する。H8 道示以降の支承抵抗力に対してはどのケースについても波力が抵抗力を超過しない。

次に、鉛直波力については最も鉛直波力が小さくなるケース B-2 を除いたほとんどのケースにおいて波力が H2 道示以前および H8 道示以降の支承抵抗力を超過する結果となる。また、B-1 においては波力が支承抵抗力を大きく上回る結果となる。

回転を考慮した支承部の鉛直反力については、概ね回転を考慮しない場合の鉛直波力の比較結果と同様の傾向であるが、全体的に抵抗力に対する比率が増加し、ケース B-2 以外の全てのケースで H2 以前の支承抵抗力を超過する。また、全体の鉛直反力では H2 道示以前または H8 道示以降の抵抗力を超過していなかったものが回転を考慮することで超過するケースが確認される（例えば断面②流速 7.0m/s）。

各津波特性ケースについて流速による応答の変化を見ると、水平波力についてはどのケースにおいても流速が大きいほど波力が大きい。鉛直波力については、B-1 については流速が大きい方が水平・鉛直ともに応答が大きいのに対し、B-2 では流速による応答の変化が小さい。これは主として波高による要因と考えられ、B-1 については流速が速いほど段波波高も高くなるのに対し、B-2 については流速によらず段波波高を桁高に合わせたことによる。G-1、G-2 については越流時の流速を合わせていることから波力は各ケースで同程度と予想されたが、G-1 については流速が大きいほど波力も大きくなっている。これは若干の水面勾配の差など、他の要因によると考えられる。

表-5 波力および支承反力の各抵抗力に対する比率（応答値／抵抗力）

(a) 上部工断面①

最大 流速	津波 特性	H2道示以前				H8道示以降		
		水平波力/ 水平抵抗	水平波力/ 変位制限抵抗	鉛直波力/ 鉛直抵抗	支承反力/ 支承鉛直抵抗	水平波力/ 水平抵抗	鉛直波力/ 鉛直抵抗	支承反力/ 支承鉛直抵抗
3.0m/s	B-1	2.45	0.82	5.31	8.34	0.33	1.77	2.78
	B-2	1.94	0.65	4.20	5.75	0.26	1.40	1.92
	G-1	1.07	0.36	2.90	4.12	0.14	0.97	1.37
	G-2	0.74	0.25	-1.56	0.21	0.10	-0.52	0.07
5.0m/s	B-1	5.03	1.68	21.94	27.35	0.67	7.31	9.12
	B-2	2.71	0.90	1.65	2.87	0.36	0.55	0.96
	G-1	2.01	0.67	4.61	7.45	0.27	1.54	2.48
	G-2	1.83	0.61	-3.48	0.28	0.24	-1.16	0.09
7.0m/s	B-1	6.90	2.30	31.79	40.44	0.92	10.60	13.48
	B-2	3.64	1.21	0.93	1.39	0.49	0.31	0.46
	G-1	3.55	1.18	6.08	9.61	0.47	2.03	3.20
	G-2	3.27	1.09	-3.14	1.41	0.44	-1.05	0.47

(b) 上部工断面②

最大 流速	津波 特性	H2道示以前				H8道示以降		
		水平波力/ 水平抵抗	水平波力/ 変位制限抵抗	鉛直波力/ 鉛直抵抗	支承反力/ 支承鉛直抵抗	水平波力/ 水平抵抗	鉛直波力/ 鉛直抵抗	支承反力/ 支承鉛直抵抗
3.0m/s	B-1	2.20	0.73	4.22	9.48	0.29	1.41	3.16
	B-2	1.93	0.64	2.18	4.26	0.26	0.73	1.42
	G-1	0.88	0.29	0.83	1.85	0.12	0.28	0.62
	G-2	0.64	0.21	-2.98	-2.28	0.08	-0.99	-0.76
5.0m/s	B-1	5.04	1.68	18.99	31.02	0.67	6.33	10.34
	B-2	2.55	0.85	0.68	3.93	0.34	0.23	1.31
	G-1	1.94	0.65	2.46	3.97	0.26	0.82	1.32
	G-2	1.89	0.63	-6.27	-4.40	0.25	-2.09	-1.47
7.0m/s	B-1	6.79	2.26	26.62	43.91	0.91	8.87	14.64
	B-2	3.32	1.11	0.34	4.17	0.44	0.11	1.39
	G-1	3.02	1.01	3.32	5.67	0.40	1.11	1.89
	G-2	2.93	0.98	-4.03	-1.61	0.39	-1.34	-0.54

各津波特性ケースについて、支承部抵抗力を H2 道示以前と H8 道示以降に分けて、水平・鉛直波力、支承鉛直反力をそれぞれの抵抗力に対する比率で表したものを表-5 に示す。表中の数字が 1 を超えると応答値が抵抗力を超過することを表す（網かけ部）。なお、変位制限構造については H2 道示以前に設計された橋梁に設置されるものであることから H2 道示以前に含めた。

これによると、H2 道示以前については、水平波力について流速 3.0m/s の漸増波のケースを除いて全てのケースで抵抗力を超過する。ただし、水平波力について変位制限構造の抵抗力を考えた場合、流速が 3.0m/s、5.0m/s のケースについては抵抗力を超過しないものが多い。鉛直波力については、G-2 のケースでは下向きの鉛直波力となり抵抗力を超過しないが、その他のケースでは半数以上において抵抗力

を超過する。

また、H8 道示以降を見ると、水平波力は全てのケースで抵抗力を超過しない結果となる。また、鉛直波力については B-1 の場合については全ての場合において抵抗力を超過する。漸増波である G-1、G-2 については抵抗力を超過するケースが半数程度であるが、回転を考慮した支承鉛直反力で見えた場合、鉛直波力は抵抗力以下だったものが支承鉛直反力については抵抗力を超過するケースが多い。この傾向は特に上部工断面②のケースにおいて顕著であり、この要因は上部工断面②における張出し部に作用する波力や、桁が中心に寄っているためにモーメントに抵抗するアーム長が短いことが考えられるが、特定するにはより詳細な検討が必要である。結果として、支承鉛直波力は G-2 を除いたほとんど全てのケースにおいて抵抗力を超過する。

5. まとめ

本稿では、桁の流出形態について水平方向、鉛直方向、回転に着目し、それぞれに対応する津波波力すなわち外力と支承部の抵抗力すなわち耐力とを比較をすることで、各流出形態の可能性について分析した。なお津波波力については段波と漸増波について4ケースの津波特性に分類して算出し、支承部抵抗力については設計基準の変化を踏まえて平成2年道示以前と平成8年道示以降に分けて算出した。これにより得られた知見を以下に示す。

- (1) 津波による水平波力についてはほぼ全てのケースにおいてH2道示以前の支承部抵抗力は超過し、かつH8道示以降の支承抵抗力は超過しない。また、H2道示以前の示方書に基づいて設計された橋梁について、H8道示以降の示方書による変位制限構造が設置されている場合、最大流速および津波特性によっては波力は変位制限構造の耐力以下となる。
- (2) 津波による鉛直波力については漸増波でかつ越流時の流速が速い場合を除いて概ねH2道示以前の支承部抵抗力を超過する。また、流速および津波特性によってはH8道示以降の支承抵抗力も超過する。特に波高が高い段波による鉛直波力は抵抗力に対する比率が大きい。
- (3) 鉛直波力およびモーメントによる支承単体に作用する鉛直反力の抵抗値超過については鉛直波力と同様の傾向であるが、モーメントの影響により抵抗力に対する比率はより大きくなる。この傾向は上部工断面②においてより顕著であるが、これは張出し部に作用する波力や、桁が中心に寄っているためにモーメントに抵抗するアーム長が短いことが要因であると考えられる。

参考文献

- 1) 庄司 学, 森 洋一郎: 桁橋の津波被害再現実験, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.801-805, 2006.
- 2) 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 津波作用時における橋梁周辺の流れと流体力に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.55, pp.789-465, 2009.
- 3) 二井伸一, 幸左賢二, 庄司 学, 木村吉郎: 津波形状の違いによる橋梁への津波作用力に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.474-485, 2010.
- 4) 鳴原良典, 藤間功司, 庄司 学: 橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算, 地震工学論文集, Vol.30, pp.899-904, 2009.
- 5) 米山望, 直田梓, : 橋梁に作用する津波波力評価に対するVOF法に基づく数値計算法の適用性検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp. 246-250, 2012.
- 6) 庄司学, 平木雄, 江面嘉之, 飯高稔, 藤間功司, 鳴原良典: 橋桁に作用する津波波力の水平成分と鉛直成分の発生メカニズムに関する実験的考察, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.4, pp. 1134-1144, 2012.
- 7) 坂本佳子, 原田隆典, 村上啓介, 福田利紀, 野中哲也: 津波により桁流失した床版橋の再現解析と水路実験, 構造工学論文集, Vol.58A, pp. 387-398, 2012.
- 8) 中尾尚史, 張広鋒, 炭村透, 星隈順一: 上部構造の断面特性が津波によって橋に生じる作用に及ぼす影響, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.4, pp. 42-54, 2013.
- 9) 奈良崎泰弘, 田崎賢治, 佐々木達生: 橋梁上部工に作用する津波波力の特性に関する解析的検討, 第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム, pp. 9-16, 2012.
- 10) 財団法人沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, 2010.
- 11) 福井芳郎, 白石英彦, 中村 充, 佐々木泰雄: 津波の研究(I), 海岸工学講演会講演集, Vol.9, pp. 44-49, 1962.