

気仙大橋の水理実験と流出メカニズム

(株)長大 正会員 ○虻川 高宏
 八戸工業大学大学院 正会員 長谷川 明

1. 目的

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北地方を中心に甚大な被害をもたらした多くの人命と財産が失われた。なかでも気仙大橋は津波により主桁が約300m上流、床板の一部がさらに約100m上流に流出するなど被害が甚大であった。本研究では気仙大橋において水路実験を行い、模型に作用する力と支承の耐力を比較することで流失メカニズムについて検証した。

2. 実験方法

実験模型は縮尺 $N=1/50$ で作成し(図-1)、開水路実験装置(図-2)により模型に作用する力を分力計(水平方向および鉛直方向の2成分)で測定した。津波流速 V_R は、陸前高田市への津波到来時の浮遊物の映像記録から、平均7.0 m/sec(最大9.0 m/sec)と推定¹⁾されている。実験では平均流速に着目し、実験流速 V_M はフルード数 Fr を一定とし、 $V_M = V_R \sqrt{1/N} = 7.0 \sqrt{1/50} \approx 1.0$ m/secとした。

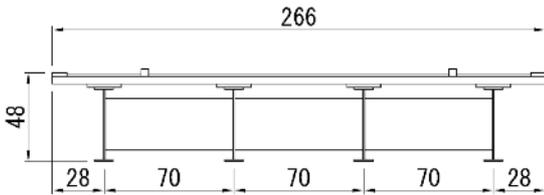


図-1 模型断面図 (N=1/50, mm)

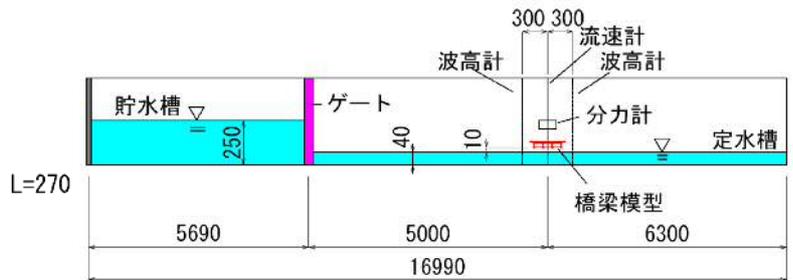


図-2 実験水路側面図 (mm)

3. 模型に作用する力

図-3に分力波形を示す。津波が模型に衝突した後の1秒間を衝撃時、安定した流れの状態である2~5秒後の3秒間を定常時と定義する。実験により得られた分力値(3回計測)を表-2に示す。 F_x は水平方向の力、 F_z は正が鉛直下向き、負が鉛直上向き方向の力を示す。津波が作用した瞬間に F_x が最大となり、鉛直上向き力 $F_z(-)$ が発生する。定常時には F_x が最大値の35%程度に下がり、鉛直下向き力 $F_z(+)$ が作用する。実橋梁に換算した分力 F_R を表-3に示す。実験模型の分力 F_M を縮尺 N で換算し、 $F_R = F_M / N^3 = F_M \times 50^3$ とした。

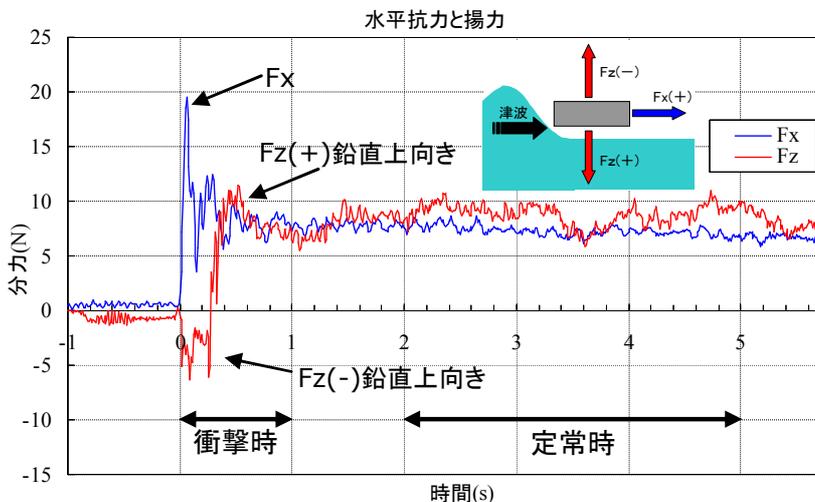


図-3 模型に作用する分力計の応答波形

表-2 橋梁模型に作用する分力 F_M

		1回目	2回目	3回目	Ave	Cd, CL
		N	N	N	N	
衝撃時	$F_x(+)$	19.51	17.91	21.39	19.60	3.03
	$F_z(-)$	-6.33	-6.56	-10.79	-7.89	-0.22
	$F_z(+)$	11.52	14.01	13.31	12.95	0.36
定常時	$F_x(+)$	7.29	6.24	6.84	6.79	1.05
	$F_z(+)$	8.81	7.17	7.74	7.91	0.22

※代表流速1.0m/secに補正した値

表-3 実橋梁に換算した津波分力 F_R

	実橋換算	延長13.5m換算	
		kN	kN/m
衝撃時	$F_x(+)$	2450	181.5
	$F_z(-)$	-986.63	-73.1
	$F_z(+)$	1618.24	119.9
定常時	$F_x(+)$	848.61	62.9
	$F_z(+)$	988.28	73.2

キーワード 東日本大震災, 津波, 橋梁, 水理実験, 安定照査, 気仙大橋

連絡先 〒984-0051 宮城県仙台市若林区新寺一丁目2番26号 (株)長大 仙台技術部 TEL 022-781-8628

4. 実橋の安定照査

平面フレームモデルに表-3 の等分布荷重を作用させて支点反力を算出した。鉛直力については図-4 に示すように水平力 Fx による偶力を考慮した鉛直反力 RH を算出した。算出結果を表-4 に示す。

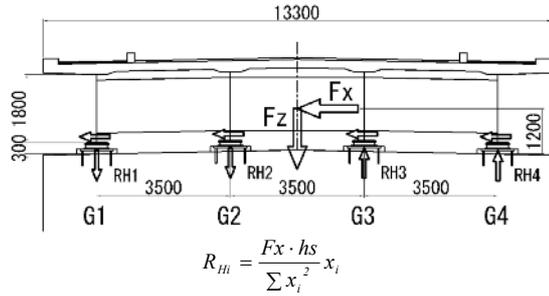


図-4 Fx により生じる鉛直反力 RH_i

表-4 支点・支承反力

			A1	P1	P2	P3L	P3R	P4	A2	
支点反力	衝撃時	水平方向	Fx kN	2947	6816	6952	2852	2852	7346	2878
		鉛直方向	Fz kN	-1051	-2893	-2893	-1051	-985.2	-3288	-985.2
	定常時	水平方向	Fx kN	1021	2362	2409	988.3	988.2	2546	997.5
		鉛直方向	Fz kN	1053	2897	2897	1053	986.6	3293	986.6
死荷重反力			Rd kN	1680	4653	4653	1680	1527	5418	1527
支承反力	衝撃時	水平方向	H4 kN	2932	1704	1738	713	713	1837	2863
		鉛直方向	V4 kN	-171	-318	-333	-160	-182	-285	-185
	定常時	水平方向	H4 kN	1016	591	602	247	247	636	992
		鉛直方向	V4 kN	570	1625	1619	573	518	1895	517

支承の耐力と実験で計測された分力を比較することにより、橋梁の安定性および流失したメカニズムを推測した。支承の耐力は、ゴム本体・取付けボルト・せん断キー・アンカーボルトについてせん断力及び引張力を対象とした。ゴム本体の破断せん断ひずみは 350%ひずみ、引張破断応力は 5N/mm²、取付けボルト 8.8、アンカーボルト SS400、せん断キー SM490 の引張強さは 830N/mm²、400N/mm²、490N/mm²、せん断強さは引張強さの 1/√3 とした。支承破断耐力と作用力の比較結果を表-6 に示す。破壊ステップは 1) P4 橋脚の取付けボルト破断、2) P2 橋脚の取付けボルト破断、3) P3 橋脚のゴム支承破断、4) P1 橋脚の取付けボルト破断、5) 全体的な桁の流出という順序で推移したと推測される。流速 7.0m/s では定常時で流出することなく、衝撃時で流出する結果となったが、気仙大橋が津波を受けて流される写真記録からは定常的な流れで流出した²⁾ことが報告されている。定常時において破壊する流速を逆算すると、P4 橋脚取付けボルトで 7.8m/sec となることから、実際の津波流速はそれ程度以上であったと想定される。実際の支承部損傷状況を表-5 に示す。取付けボルトが破断するか、アンカーボルトが破断するかの違いは見られるが、概ね破壊傾向は一致する。

表-5 実際の支承部損傷

	支承			
	G1	G2	G3	G4
A1	ゴム破断	ゴム破断	ゴム破断	ゴム破断
P1	ゴム破断	取付けボルト破断	取付けボルト破断	取付けボルト破断
P2	取付けボルト破断	ゴム破断	取付けボルト破断	アンカーボルト破断
P3L	ゴム破断	ゴム破断	ゴム破断	ゴム破断
P3R	ゴム破断	ゴム破断	ゴム破断	ゴム破断
P4	アンカーボルト破断	アンカーボルト破断	アンカーボルト破断	取付けボルト破断
A2	ゴム破断	ゴム破断	ゴム破断	ゴム破断

G4が海側(津波作用側)を示す。

表-6 支承破断耐力を作用力の比較

			A1	P1	P2	P3L	P3R	P4	A2	
衝撃時	津波作用力	水平	kN	3793	1293	1925	776	775	1587	3388
		鉛直	kN	-267	-135	-416	-188	-209	-174	-243
	ゴム破断耐力	水平	kN	448	1059	1059	448	448	1260	448
		%	%	122.1%	181.8%	173.2%	172.9%	126.0%	-	
	引張	kN	-800	-842	-515	-	-	-	-967	-800
		%	%	33.3%	16.1%	80.8%	-	-	18.0%	30.4%
	取付けボルト破断耐力	水平	kN	677	880	880	677	677	677	677
		%	%	147.0%	218.8%	114.7%	114.5%	234.6%	-	
	引張	kN	-1172	-1524	-1524	-1172	-1172	-1172	-1172	-1172
		%	%	22.8%	8.9%	27.3%	16.1%	17.9%	14.8%	20.8%
	せん断キー	水平	kN	3200	6421	6421	3200	3200	8888	3200
		%	%	-	20.1%	30.0%	24.3%	24.2%	17.9%	-
アンカーボルト破断耐力	水平	kN	569	940	940	569	569	940	569	
	%	%	137.5%	204.7%	136.4%	136.2%	168.8%	-		
引張	kN	-985	-1629	-1629	-985	-985	-1629	-985		
	%	%	27.1%	8.3%	25.6%	19.1%	21.2%	10.7%	24.7%	
変位制限耐力	水平	kN	2747	-	-	-	-	-	2502	
	%	%	138.1%	-	-	-	-	-	135.4%	
定常時	津波力作用力	水平	kN	1315	448	667	269	268	550	1174
		鉛直	kN	24	272	175	51	38	300	26
	ゴム破断耐力	水平	kN	448	1059	1059	448	448	1260	448
		%	%	42.3%	63.0%	60.0%	59.9%	43.7%	-	
	引張	kN	-800	-1219	-1219	-447	-447	-1503	-800	
		%	%	-	-	-	-	-	-	
	取付けボルト破断耐力	水平	kN	677	880	880	677	677	677	677
		%	%	50.9%	75.8%	39.7%	39.7%	81.3%	-	
	引張	kN	-1172	-1524	-1524	-1172	-1172	-1172	-1172	
		%	%	-	-	-	-	-	-	
	せん断キー	水平	kN	3200	6421	6421	3200	3200	8888	3200
		%	%	20.1%	30.0%	24.3%	24.2%	17.9%	-	
アンカーボルト破断耐力	水平	kN	569	940	940	569	569	940	569	
	%	%	47.7%	70.9%	47.3%	47.2%	58.5%	-		
引張	kN	-985	-1629	-1629	-985	-985	-1629	-985		
	%	%	47.9%	-	-	-	-	46.9%		
変位制限耐力	水平	kN	2747	-	-	-	-	-	2502	
	%	%	47.9%	-	-	-	-	-	46.9%	

%は、作用力/破断耐力で算出しており、100%を超える場合破断する。

5. 結論

水路実験結果と支承耐力比較により、定常的な流れの状態では流速 7.8m/sec 以上が作用し、水平的な力により流出したと想定される。ただし、取付けボルトだけ破断した支承では、せん断キーは破断していないと考えられ、水平力だけではなく浮き上がる力も作用して流出したのではないかと想定される。

今後は津波により発生する鉛直方向力や回転モーメントを把握し、流出メカニズムを解明し、効果的な橋梁の津波対策について研究を実施していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 佐々木ら：桁抵抗力津波作用力比に基づく橋梁の被害分析，構造工学論文集 Vol. 59A, 2013
- 2) 神宮寺ら：画像及び数値解析手法を用いた気仙大橋の津波被害分析，構造工学論文集 Vol. 60A, 2014