

リーフ上に建設された海岸橋梁の高波時の安全管理について

Safety Traffic Control for a Coastal Bridge Constructed on a Reef under Storm Wave Conditions

木村克俊¹・渡辺 元²・山本泰司³・岡田 務⁴・名越隆雄⁵・三船竜二⁶

Katsutoshi KIMURA, Hajime WATANABE, Yasuji YAMAMOTO
Tsutomu OKADA, Takao NAKOSHI and Ryuji MIFUNE

Safety traffic control measures for a temporary bridge, which was constructed with a permeable floor over a road (National Route 229) on a coastal reef, were studied through a hydraulic model experiment and field observation. When the offshore wave height exceeded 4 meters, a large wave force was acted to passing vehicles. It was thus revealed that road closure or other measures would be necessary before the offshore wave height reached 5 meters to ensure the safety of vehicles. It was also found that the wave height could be estimated from the wave pressure measured with wave pressure gauges installed on a bridge pier, and that it would be possible to make full use of such wave pressure data for traffic control on the bridge.

1. はじめに

2004 年 9 月 8 日に北海道西岸を北上し広い範囲を暴風圏に巻き込んだ台風 0418 号は、北海道日本海沿岸各地に高波による被害をもたらした。北海道積丹半島西岸を通る一般国道 229 号神恵内村に架かる大森大橋（延長 429 m）では、写真-1 に示すように 2 径間連続 PC 合成 I 桁 2 連区間（延長 159 m）が高波により落橋する災害が発生した（石川ら，2005）。

本国道は、神恵内村中心部と周辺地区を結ぶ重要な道路であり、落橋によって住民の日常生活に大きな支障を

与えることから早期の復旧が求められた。このため 2004 年 12 月に高波による揚圧力を軽減する目的で、走行面をグレーチング床版とした鋼製トラス橋による仮橋が完成した。これにより本区間は通行可能となったが、走行車両が波の影響を受けやすくなったため、高波時には適切な管理が必要となった。

海岸橋梁の耐波性については、津波を対象とした研究が庄司ら（2006）によって行われている。しかしながら、高波を対象とした検討例はなく、橋梁上の車両通行の安全性について参考となる知見が見当たらないのが現状である。このため本研究では、現地観測および水理模型実験を実施して、仮橋の通行止めの基準や、モニタリングしたデータの安全管理への適用性について検討を行った。

2. 大森大橋の被災と復旧の概要

(1) 被災メカニズム

大森大橋の落橋被害をもたらした台風 0418 号は、勢力を維持したまま 9 月 8 日に北海道西岸を北東に進んだ。この台風により神恵内村周辺海域では、同日 13～14 時に平均風速が 30 m/s を超える南西の風（海岸に直角方向）が吹き、13 時に沖波波高の極大値 $H_0=7.58$ m、周期 $T_0=11.8$ s の波が発生した。また、潮位は台風による気圧の低下に伴う海面の吸い上げ効果と、海岸線に対して直角方向である南西の強風による吹き寄せ効果により、小樽港の潮位観測記録では 14 時に最大潮位 T. P. +85 cm を記録した。

一方、大森大橋の周辺は図-1 に示すように T. P. +0.5 m 程度の平坦なリーフ上に位置し、リーフの沖側は水深 10 m 程度まで急激に落ち込み、リーフの陸側は急峻な崖が落橋区間を囲むような湾状地形を呈している。

そのため、半閉鎖的空間となった大森大橋の周辺では、

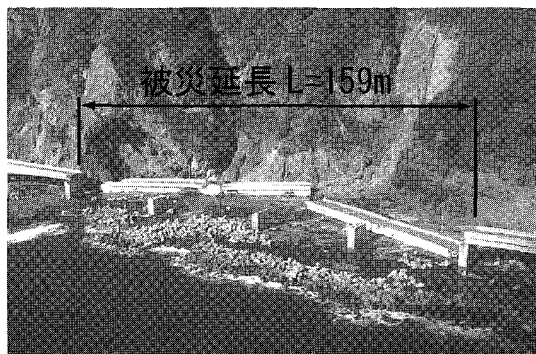


写真-1 大森大橋の被災状況

1 正 会 員	博(工)	室蘭工業大学教授 建設システム工学科
2 学生会員		室蘭工業大学大学院 建設システム工学専攻
3 正 会 員	博(工)	(独法)土木研究所寒地土木研究所寒地水圏研究グループ 上席研究員
4		国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部道路第1課 課長 (前小樽開発建設部)
5 正 会 員		(株)ドーコン防災保全部 主任技師
6		北日本港湾コンサルタンツ(株)技術部環境・水理課 係長

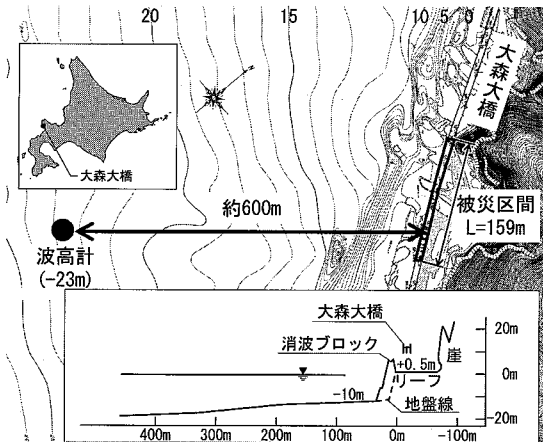


図-1 大森大橋の位置

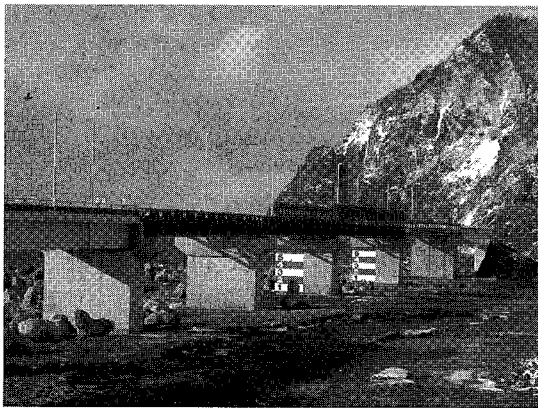


写真-2 仮橋(トラス橋)

入射波と背後の崖からの反射波との重複波によって橋桁の下方から波力が作用して沖側の桁を持ち上がり、陸側にスライドして落下したと考えられる。

(2) 仮橋の概要

本間ら(2005)は水理模型実験により橋桁に作用する波力を検討した。被災時 ($H_0=8.0\text{ m}$, $T_0=12.0\text{ s}$) では、I桁橋に作用する最大鉛直波力は自重 (200 kN/m) と同程度であった。一方、打ち上がった波を透過させるトラス橋の場合はI桁橋に比べて最大鉛直波力は1/5以下に低減できることがわかった。

そこで本復旧までは、短期間に調達可能で高波浪時の波力低減効果も期待できるトラス橋により応急復旧を行うこととなった(写真-2参照)。

3. 通行車両への作用波力に関する水理模型実験

(1) 実験の方法

水理模型実験は長さ22m、幅0.8m、高さ2mの2次元造波水路を使用し、図-2に示す実験模型を用いて現地のトラス桁と橋脚部分を縮尺1/25で再現した。な

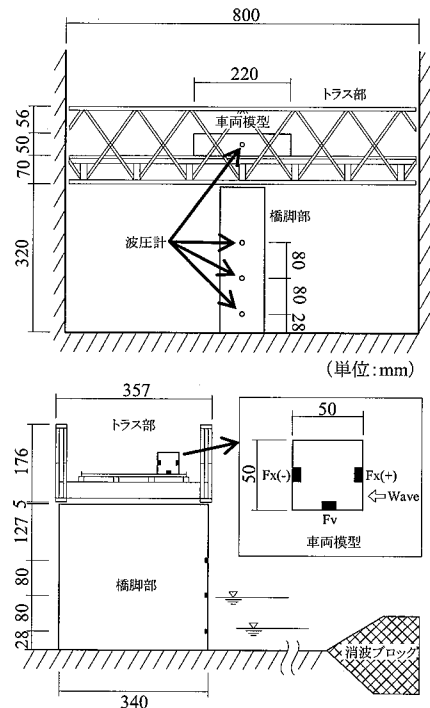


図-2 トラス橋と車両の実験模型

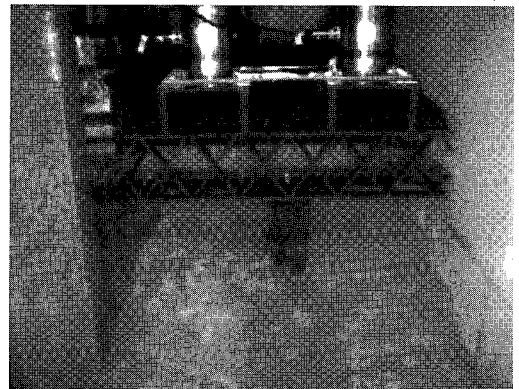


写真-3 トラス橋の実験模型

お、リーフ上の橋梁および海崖の位置関係は被災箇所の条件に合わせた。実験波はすべて不規則波を用いた。橋脚には現地と同様に波圧計を3箇所に設置するとともに、橋梁内に車両模型を設置してグレーティングやトラス部材を透過した水塊の衝突によって生ずる波力を求めた。実験水路内に設置したトラス橋の状況を写真-3に示す。

(2) 作用波力特性

橋梁上の車両にはトラス部材を透過した水塊による水平波力と、床面のグレーティングを透過した水塊による鉛直波力が作用する。とくに高潮位条件では、位相差を伴って2つの波力が作用することが分った。不規則波群中

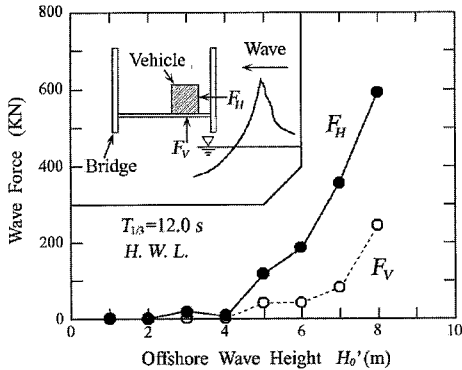


図-3 通行車両に働く水平および鉛直波力

の最大波力（5波群平均値）に着目して、図-3に示するような波力と波高の関係を得た。これより沖波波高5.0mで車両が被害を受ける危険性があることが明らかとなった。

橋脚に働く波圧は、沖波波高があるレベルに達した時点で発生し、その後の波圧は沖波波高に比例する。さらに、波の周期や潮位の影響を検討した。

4. 越波に関する現地観測

大森大橋では通行安全管理のための CCTV カメラによる越波状況の常時モニタリングに加え、落橋後の2004年11月以降には波浪・波圧などの各種データの取得を行っている。表-1および図-4にその概要を示す。

(1) 波浪観測

波浪観測は、前出の図-1に示すように、水深23m地点に設置された水圧式波高計で行った。観測は毎正時±10分（計20分間）、サンプリング間隔は0.5秒であ

表-1 越波に関連した観測概要

観測項目	調査期間	備 考
波 浪	①2004年10月4日～ 2004年11月4日 ②2005年11月27日～ 2006年1月29日	水深23m 水圧式
波圧・潮位	2004年12月～	橋脚に3箇所

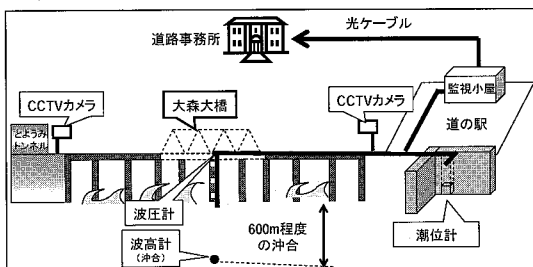


図-4 波圧・潮位観測状況図

表-2 有義波高が3mを越えた期間とその状況

期 間	波浪諸元	
	最高波	有義波
2005年11月29日～ 12月1日	10.4 m, 12.3 s 波向 SW	6.5 m, 11.2 s 波向 SW
12月3日	5.7 m, 7.9 s 波向 WSW	3.2 m, 7.5 s 波向 WSW
12月10日～11日	7.1 m, 7.8 s 波向 WSW	4.3 m, 8.9 s 波向 WSW
12月26日	7.2 m, 9.9 s 波向 SW	4.5 m, 10.0 s 波向 SW
12月27日	6.4 m, 7.8 s 波向 W	3.1 m, 7.4 s 波向 W
2006年1月3日	6.0 m, 7.6 s 波向 W	3.4 m, 7.7 s 波向 W

る。波浪と波圧・潮位が同時に観測されている2005年度調査を整理した。観測中に有義波高が継続して3mを超えた期間は、表-2に示すとおり計6回である。期間中の最大波は11月29日に観測され、最高波で11.4m（周期12.3秒、波向SW）、有義波で6.5m（周期11.2秒、波向SW）であった。この期間の時化は12月1日まで継続し、有義波4m以上の期間が15時間程度続く等、継続時間の長い大きな時化が観測された。

(2) 波圧・潮位観測

a) 観測方法

波圧・潮位観測は、2004年12月から大森大橋P5橋脚に波圧計3台、近隣の船揚げ場に潮位計を設置し観測を続けている。波圧計3台の設置高さは、T.P.=+1m, +3m, +5mとした。波圧計のサンプリングは100回/秒、潮位計のサンプリングは2回/秒である。波圧計データは、現地ステーション内のデータ回収用PCに集積され、データ確認用PCでリアルタイムにデータ状況を確認できる他、同時に小樽開発建設部岩内道路事務所にもデータが転送され、同様のデータが確認できるシステムとなっている。

b) 波圧観測結果

波浪観測と波圧観測が同時に行われている期間のデータを用いて、波高と波圧の関係を推定した。解析対象は、波浪による通行規制が実施されており、かつ観測期間中に最大波が観測され、継続時間も最長である2005年11月29日～12月1日とした。なお波圧(P)の処理方法は、ゼロアップクロスによるピーク値の読み取りと統計処理($P_{\max}$, $P_{1/20}$, $P_{1/10}$, $P_{1/3}$)である。最大波圧と有義波高の関係を図-5に示す。橋脚に作用する波圧は、沖波波高があるレベルに達した時点で発生し、その後の波圧は沖波波高に比例している。図中の直線は、波圧が作用する波圧の下限波高で、以下のように表される。

上部(T.P.=+5.0m): $P_{\max}(\text{kPa}) = 18.08 H_{1/3}(\text{m}) - 74.13$

中部(T.P.=+3.0m): $P_{\max}(\text{kPa}) = 26.67 H_{1/3}(\text{m}) - 72.28$

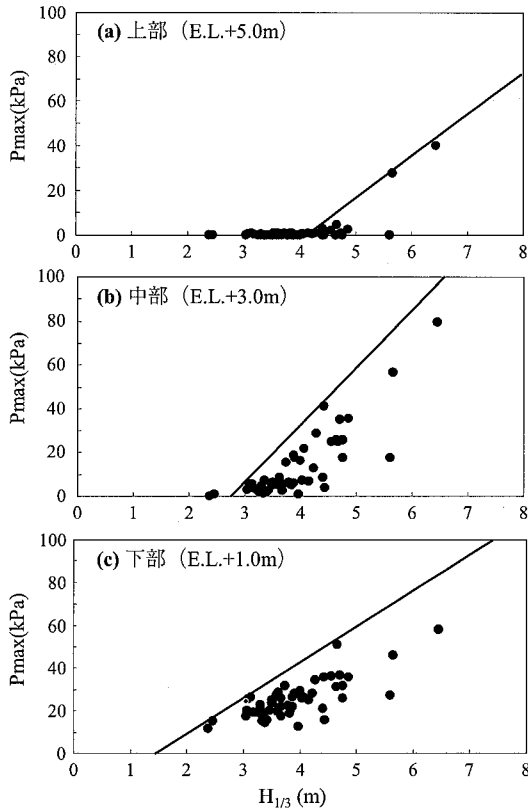


図-5 最大波圧と有義波高の関係



写真-4 CCTVカメラによる飛沫の打ち上げ記録

下部(T.P.=+1.0m): $P_{\max}(\text{kPa})=16.00 H_{1/3}(\text{m})-22.40$

この関係から、波圧計各部に波が作用する場合には概ね上部で有義波4.1m以上、中部で同2.7m以上、下部で同1.4m以上の波浪が来襲しているものと推定される。越波による通行規制の目安は概ね波高4mとしているが、その場合には橋脚(高さ約10m)のほぼ中間の高さまで水塊が達している状態であると思われる。

(3) 越波観測

写真-4のような越波の著しい期間を対象に、CCTV

表-3 高波浪時の打ち上げ高

	打ち上げ高 $R(\text{m})$			波浪諸元	
	$R_{\max}$	$R_{1/10}$	$R_{1/3}$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$
2005年11月29日 16:10~16:30	19.3	16.8	14.5	4.4	8.3
2005年11月29日 16:32~16:52	20.6	18.4	15.9	4.4	8.3
2005年11月30日 06:15~06:35	17.6	16.4	13.8	4.6	9.7
2006年2月27日 11:33~11:59	20.4	15.0	12.3	3.6	—
2006年9月19日 20:01~20:28	26.8	19.8	16.2	4.1	—
2006年11月22日 21:43~22:12	20.7	15.9	13.0	4.2	—

注)2006年の波高は、橋脚に作用する波圧からの推定値

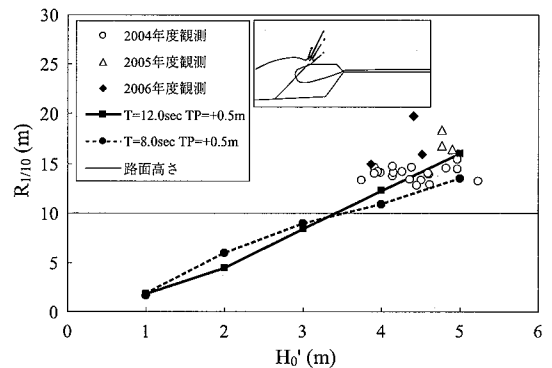
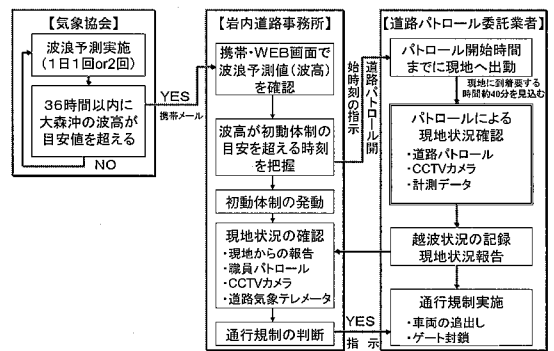

図-6 打ち上げ高($R_{1/10}$)と沖波波高の関係


図-7 初動体制発動から通行規制までの流れ

カメラ映像約20分間(120~160波程度)の記録から1波ごとの飛沫の打ち上げ高さを読み取り、その統計値を求めた。表-3には2005, 2006年度の読み取り結果を示している。なお表中の2006年度の波高は、橋脚に作用する波圧と図-5の関係を用いて推定した波高である。

飛沫の打ち上げ高さの頻度分布を求め、超過確率4.5%に相当する1/10最大打ち上げ高さ(と沖波波高)の関係

表-4 規制開始・解除日時 (仮橋供用後)

規制開始日時	規制解除日時	期間	
		日	時間
2005年11月29日 18:30	2005年11月30日 18:00	0	23.5
2006年2月27日 14:30	2006年2月28日 00:00	0	9.5
2006年9月19日 19:00	2006年9月20日 09:00	0	14.0
2006年11月22日 15:00	2006年11月23日 10:00	0	19.0
2007年2月15日 09:20	2007年2月16日 08:30	0	23.2
2007年3月11日 15:30	2007年3月13日 08:30	1	16.5

を求め、図-6に示した。図中の実線で示しているのは、本問ら(2005)による実験結果である。現地では実験値より最大で1.3倍ほど大きな値となるが、これは模型のスケール効果や現地での風の影響であると考えられる。

5. 現地における高波時の通行規制

(1) 通行規制の手順

現地においては、図-7に示す手順で大森大橋(仮橋)の通行規制を行ってきた。波浪予報が、越波飛沫が路面に打ち上げられる波高である3mに達した時点でパトロールを強化し、予報が規制の目安値4mに達した時点で通行止めの準備を開始する。その後、現地からの報告、CCTVカメラ画像、道路気象テレメータ等の情報から、通行車両に危険が及ぶと判断された場合に通行を規制した。

(2) 通行規制の状況

仮橋供用開始後である2004年12月以降、大森大橋が高波による通行規制を受けたのは、表-4に示すとおり計6回であった。

図-8はそのうちの1例として、2005年11月29日～12月1日までの波圧計データから沖波波高を推定したものである。現地ではパトロール強化、通行車両への徐行指示等を経て、11月29日18時30分～11月30日18時まで全面通行止めが講じられた。波圧計から推定される波高をみると、通行規制開始時には目安値である4mを大きく超え、また規制解除にはほぼ3m以下となっている。このことから、橋脚に働く波圧計のリアルタイムデータは、道路の安全な通行管理体制での判断基準として活用できることが示された。

6. ま と め

2004年台風18号による高波を受けて落橋した国道

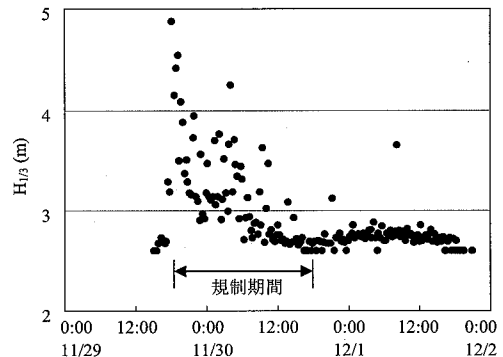


図-8 橋脚に作用する波圧から推定した波高の経時変化

229号大森大橋を復旧した仮橋の通行安全性に関して、水理模型実験および現地観測により検討を行った。主要な結論を以下に示す。

- 1) 沖波波高が4m以下では、橋梁の通行車両にほとんど波力は作用しないが、これを上回ると、水平および鉛直方向ともに大きな波力が作用する。車両の安全確保のためには、沖波波高が5mに達する前に通行止め等の措置をとる必要がある。
- 2) 高波時に実施した飛沫打ち上げ高の現地観測値は、過去に行われた模型実験値とほぼ同等かやや上回った。これは、縮尺効果や風の影響であると考えられる。
- 3) 水理模型実験並びに現地観測により、橋脚に設置した波圧計による観測波圧から波高を推定することが可能なことが分かった。
- 4) 現地における通行規制は最終的にはパトロールによる人の判断によるが、過去の通行止め事例を分析した結果、橋脚に作用する波圧データが橋梁の通行管理に十分に活用できることが分かった。

謝辞：国土交通省北海道開発局小樽開発建設部岩内道路事務所からは、現地における波浪、橋脚波圧等の観測データを提供いただくとともに、本報に対する貴重な助言を賜った。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 石川博之・畑山 朗・佐藤昌志・岸 徳光・三田村浩(2005): 2004年台風18号による大森大橋の被災メカニズム, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第1部, 第60巻, 1-425 (CD-ROM).
- 庄司 学・森洋一郎(2006): 桁橋の津波被害再現実験, 海工論文集, 第53巻, pp. 801-805.
- 本間大輔・窪内 篤・山本泰司・畑山 朗・木村克俊(2005): 台風0418号による大森大橋の被災メカニズムと応急復旧対策について, 海洋開発論文集, Vol. 21, pp. 927-932.