

## 津波衝突時に橋桁に作用する波力

## Wave Force Acts on a Bridge Girder Struck by Tsunami

片岡正次郎<sup>1</sup>, 日下部毅明<sup>2</sup>, 長屋和宏<sup>1</sup>Shojiro KATAOKA<sup>1</sup>, Takaaki KUSAKABE<sup>2</sup> and Kazuhiro NAGAYA<sup>1</sup><sup>1</sup>国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室, National Institute for Land and Infrastructure Management<sup>2</sup>国土交通省北海道開発局留萌開発建設部, Hokkaido Regional Development Bureau

**SUMMARY:** Bridges may be damaged when tsunami strikes as seen during the 2004 Indian Ocean tsunami. In this study, a series of experiment using a wave channel and bridge girder models is conducted to investigate wave force acts on a bridge girder struck by tsunami. The wave force consists of impulsive force with short duration and drag that slowly decreases. Since the peak of impulsive force highly depends on whether the wave is breaking, it is difficult to be represented in a simple manner. The drag is approximated well with some safety margin by the formula used in the standard for port facilities.

## 1 はじめに

津波が構造物に衝突すると、波力により構造物が損傷するだけでなく、崩壊あるいは流失にいたる場合もある。このため、津波の衝突が予想される港湾の施設については、設計時に津波の影響を考慮することがあり、その際、合田式[1]の長波長側の極限をとった式（以下、港湾基準式）により津波波力を与えてもよいとされている[2]。港湾基準式は Fig. 1 のように、津波波高  $H$  から高さ方向の圧力分布を与える簡便な式である。

津波が衝突するおそれのある構造物としては、港湾施設以外にも、河口付近の河川橋などが挙げられる。実際、2004年スマトラ島沖地震・津波の際にも、橋桁が流失した事例がいくつか報告されている[3]。一方、わが国では津波により近代的な橋梁が被災した事例がなく、津波衝突時に橋桁にどのような力が作用するのかが検討されていないため、津波来襲時の橋梁の安全性評価はほとんどなされていないのが現状である。

合田式や港湾基準式により波圧の高さ方向の分布が算出できるため、これらの式を橋桁に作用する波力の算出に用いることも可能である。しかし、合田式は直立壁ならびに混成堤の直立部に作用する波圧を計測した実験値に基づいており、橋桁のように構造物と静水面の間に大きな空間がある場合の適用性は明らかにされていない。

以上のような背景から、本研究では、水路を用いた模型実験を実施し、波力等の計測結果を整理、分析することにより、橋梁の津波安全性あるいは被災度の評価に用いる波力について考察する。

## 2 模型実験

## 2.1 模型の諸元

Fig. 2 のように、長さ140[m]、幅2[m]、深さ5[m]の水路に固定床の斜面（海域：1/20勾配、陸域1/100勾配）を造成し、縮尺1/18の橋桁模型（鋼製、幅員50[cm]、高さ15[cm]）を設置した。波力を計測する対象となる部分の長さ（橋軸

方向）は50[cm]であり、これを水路の中央に設置し、両端に同じ断面で長さ75[cm]の橋桁模型を設置することにより、2次元性が確保されている。

造波する孤立波の初期波高  $H_0$  と静水深  $h$  を Table 1 に示す15の組み合わせに設定し、それぞれの組み合わせで3回ずつ実験を行った。造波した孤立波の周期（水位が静水深から上昇し再び静水深付近に戻るまで）は10[s]程度である。Fig. 2のとおり、分力計で水平波力と鉛直波力を計測したほか、橋桁に波圧計を20、橋桁の周辺を中心に容量式波高計と流速計を設置した。サンプリング周期は0.002[s]とし、衝撃的な波力も測定できるようにした[4]。橋桁は薄い鋼板で支えられているが、橋桁のみを除去した実験を行い、鋼板に作用する波力は小さく無視できることを確認している。

## 2.2 計測された波力

Photo 1 は  $H_0=40$ [cm]、 $h=17.5$ [cm] の場合に水平波力が最大となった瞬間の状況を示している。これは全ケース中で最大水平・鉛直波力がともに最も大きかったケースであり、孤立波は橋桁模型に衝突する前後に砕波している。Fig. 3 はケースごとの最大波力（3回の平均値）を比較したものであるが、同じ  $H_0$  であれば  $h$  が小さいほど下流側、大きいほど上流側で砕波するため、最大波力はこのケースよりも小さくなっており、最大波力は波がどこで砕波するか

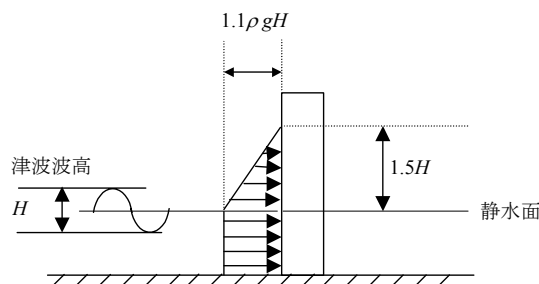


Fig. 1 Representation of wave pressure due to tsunami[2].

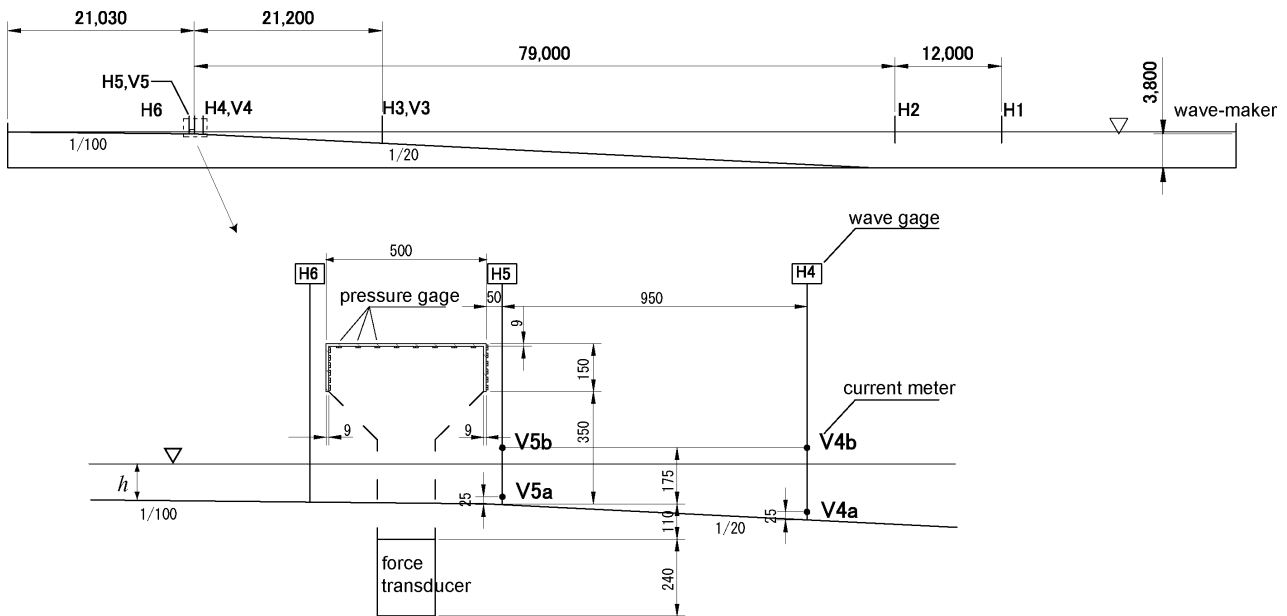


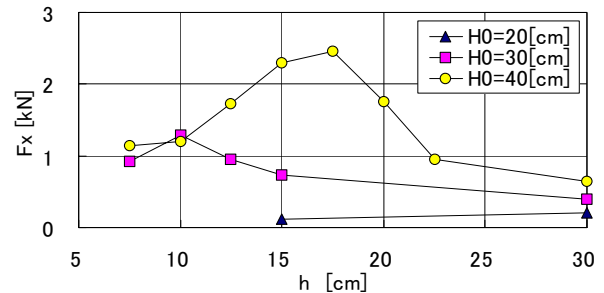
Fig. 2 Experimental setup of the bridge girder model in the wave channel (unit: mm).

Table 1 Still water level,  $h$ , set for each initial wave height,  $H_0$

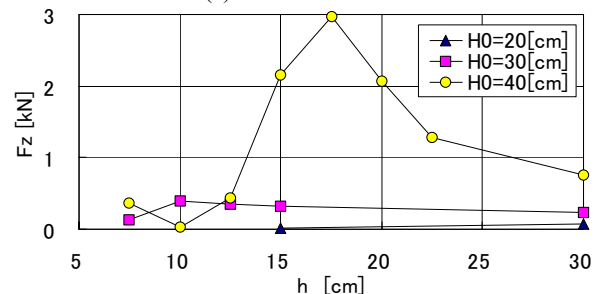
$H_0$ [cm]	$h$ [cm]
20	15, 30
30	7.5, 10, 12.5, 15, 30
40	7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 30



Photo 1 Solitary wave striking the bridge girder model ( $H_0=40$ [cm],  $h=17.5$ [cm]).



(a) Horizontal force



(b) Vertical force

Fig. 3 Peak wave forces measured from the experiment using 50cm-wide bridge girder model.

大きく影響されることが分かる。

同じ  $H_0=40$ [cm],  $h=17.5$ [cm] の場合に分力計で計測した水平・鉛直波力の時刻歴を Fig. 4 に示す。水平波力は上流側、鉛直波力は上方が正である。

水平波力には大きいピークがいくつかみられるが、波圧の時刻歴との比較により、最初と3番目のピークがそれぞれ、波が橋桁模型の下流側および上流側鉛直面に衝突した時刻にほぼ一致することが分かった。これら以外の2番目および4番目以降のピークは、模型と分力計で構成される系の振動によるものと考えられる。このため、最初と3番目のピーク、すなわち Fig. 3 に示した最大波力にも、この系の振動による影響が含まれているものと推察される。

津波衝突後 1 秒足らずでこの系の振動は減衰して小さくなり、ほぼ定常であるが漸減する力が作用するようになる。このとき、橋桁模型の下流側鉛直面では中央が最も大きく、上端あるいは下端ほど小さい波圧分布となっていることから、この力は抗力であることが確認できる。抗力が漸減するのは、水位 (Fig. 5) および流速が徐々に低下していくためである。

鉛直波力には大きなピークが1つあり、水平波力とほぼ同時に最大値となっている。鉛直波力の最大値は水平波力よりも大きく、継続時間が短い揚力が作用し、その後水平波力と同様に漸減している。

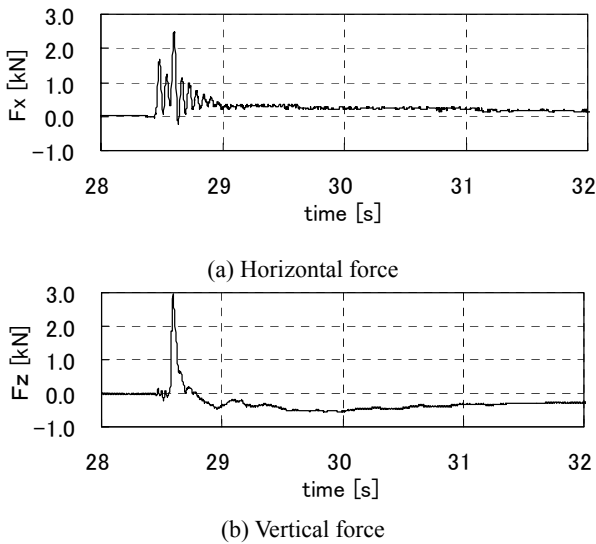


Fig. 4 Time histories of wave force on the bridge girder model ( $H_0=40$ [cm],  $h=17.5$ [cm]).

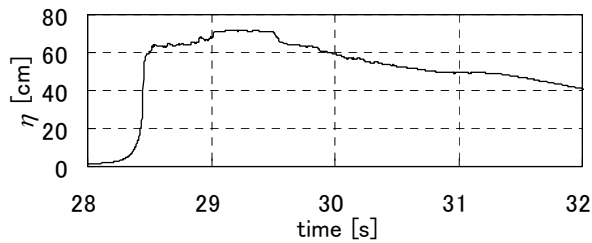


Fig. 5 Time history of water level at H5 with the bridge girder model ( $H_0=40$ [cm],  $h=17.5$ [cm]).

### 3 津波波力の橋梁への影響

#### 3.1 衝撃波力

実験で得られた水平波力の最大値は、Fig. 3 に示したとおり、 $H_0=40$ [cm]、 $h=17.5$ [cm]の場合に  $2.5$ [kN]である。これを実際の橋梁（模型の 18 倍）に作用する圧力に換算すると、フルードの相似則により圧力が 18 倍となること、橋桁模型の受圧部分の橋軸方向長さが  $0.5$ [m]であることから、実物大に換算した圧力は以下ようになる。

$$2.5 / (0.5 \times 0.15) \times 18 = 600 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (1)$$

したがって単位橋軸方向長さに作用する波力は

$$600 \times (0.15 \times 18) = 1.6 \times 10^3 \text{ [kN/m]} \quad (2)$$

となる。

一方、道路橋の橋桁の死荷重は幅員 12[m]、支間 40[m]の鋼 I 桁で単位橋軸方向長さあたり  $1.5 \times 10^2$ [kN/m]程度 [5]であり、継続時間は短い死荷重の 10 倍以上の水平力が作用することになる。ただし、このときの波高は橋桁模型付近では 60[cm]以上になっている (Fig. 5) ため、式(2)の値は、10[m]以上の津波が来襲し、さらに橋梁付近で砕波した場合の波力に相当するものと考えられるから、津波衝突時に常にこのような極めて大きい波力が作用するわけではない。

揚圧力も含め、このような衝撃波力が作用した場合には、支承、落橋防止構造が大きな損傷を受ける可能性がある。

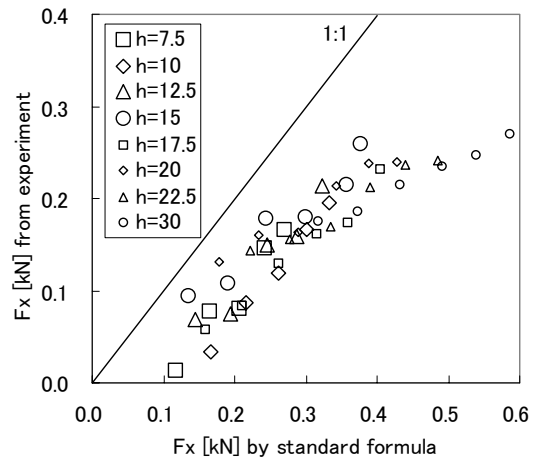


Fig. 6 Comparison between the drag obtained from the experiment ( $H_0=40$ [cm]) using 50cm-wide bridge girder model and wave force calculated by the standard formula[2].

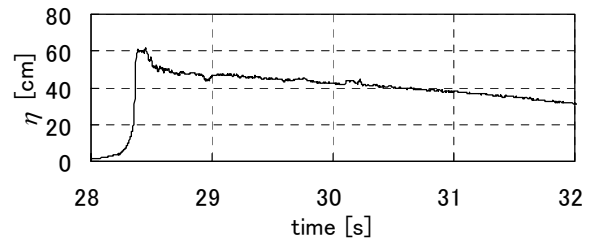


Fig. 7 Time history of water level at H5 without the bridge girder model ( $H_0=40$ [cm],  $h=17.5$ [cm]).

しかし、橋梁付近で砕波するか否かは津波波高と静水深に依存する問題であること、また特に鉛直方向の衝撃波力に対する支承の耐力が不明であることから、津波衝突時の支承の損傷程度を荷重と耐力の比較に基づいて行うことは困難である。したがって現時点では、津波に対する橋梁の被災度評価に際し、越流すれば支承、落橋防止構造が損傷する可能性があると思なすなど、荷重と耐力の評価を省略した簡便な評価を行うことも考慮する必要がある。

#### 3.2 水平抗力

衝撃波力により支承や落橋防止構造が損傷したとしても、橋桁が流失しなければ、限定的でも早期に橋梁の機能を回復できる場合がある。したがって道路橋の被災度を交通機能障害の程度で評価する場合には、構造的な損傷だけでなく、橋桁が流失するかどうかとも評価する必要がある。

前述の鋼 I 桁を対象に、Fig. 4(a)に示した水平波力の時刻歴において、津波衝突時～3番目のピーク終了時の衝撃波力と 29[s]～32[s]の水平抗力による桁の移動量を比較すると、前者は静止状態から 1.5 [m]の移動量であるのに対し、後者では静止状態から 93[m]となる。なお、水平力は実物大に換算して時間軸を  $18^{0.5}$  倍に引き延ばし、浮力と摩擦係数 0.6 の摩擦力[6]を考慮した。

したがって、実際には衝撃波力により移動し始めた橋桁が水平抗力により流失に至るといった過程を経ることも考えられるが、ここでは衝撃波力よりも水平抗力の方が橋桁の流失には影響が大きいと考え、以下では水平抗力の評価式を検討する。

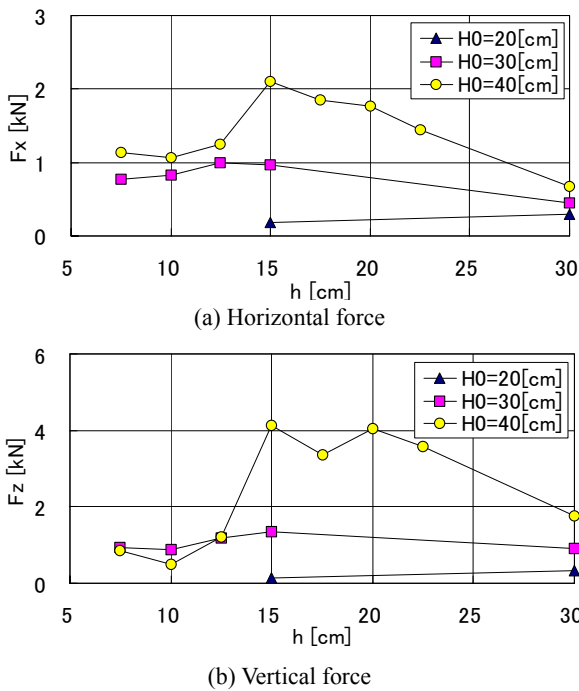


Fig. 8 Peak wave forces measured from the experiment using 100cm-wide bridge girder model.

模型の振動が十分小さくなった時点から3秒後(それ以前に波力がゼロになる場合は打ち切り)まで、0.5秒間隔で水平波力の平均値を計算した値を縦軸に、Fig. 1の港湾基準式で計算した水平波力を横軸にして描いたものがFig. 6である。この図によれば、港湾基準式で計算した水平波力は、実験で計測した水平抗力の上限を抑えており、港湾基準式により水平抗力の安全側の評価ができることを示している。ただし、港湾基準式そのままでは過大評価になるという見方もできることから、水平抗力の評価には、例えば $\rho g H$ の係数1.1を小さくすることを検討すべきかもしれない。なお、Fig. 6には $H_0=40$ [cm]の場合のみを示したが、初期波高が異なるケースについても同様であった。

一方、橋桁の流失に対する抵抗力は、(橋桁の水中重量) × (摩擦係数) となるため、橋桁が流失するか否かの評価には、橋脚上の橋桁の水中での摩擦係数が必要である。これについては今後検討する必要がある。

なお、Fig. 6の港湾基準式による波力の計算では、通常行われる橋梁の存在を無視した津波シミュレーションの結果を用いた評価を可能とするため、橋桁模型を除去した場合に波高計H5で計測した波高 $H$ を用いている。波高計H3での波高が10[cm]を超えた時間を基準とし、橋桁模型がある場合とない場合の時間を揃えて波力と波高の平均値を算出した。橋桁模型を除去した場合( $H_0=40$ [cm],  $h=17.5$ [cm])の水位の時刻歴をFig. 7に示すが、橋桁模型がある場合のFig. 5とはかなり異なっている。

### 3.3 橋桁の幅員が異なる場合

2と同様の実験を幅員100[cm]の橋桁模型でも実施した。この場合について、ケースごとの最大波力(3回の平均値)を比較したものがFig. 8、実験で得られた水平抗力と港湾基準式を比較したものがFig. 9である。Fig. 6とFig. 9を比較すると、実験で得られた水平抗力は幅員が大きい方が若干小さく、道路橋(鋼桁)の設計で用いられる風荷重[7]

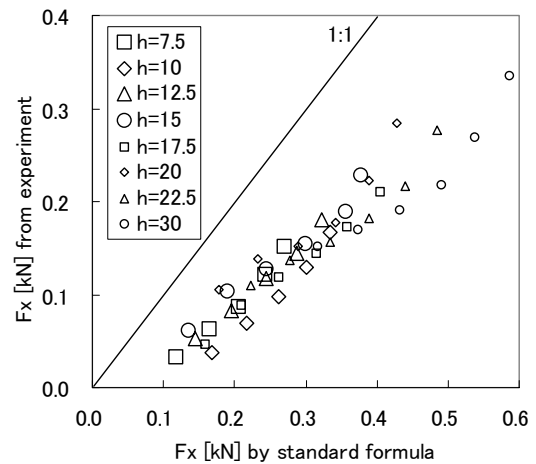


Fig. 9 Comparison between the drag obtained from the experiment ( $H_0=40$ [cm]) using 100cm-wide bridge girder model and wave force calculated by the standard formula[2].

と同様の傾向を示している。

## 4 結論

本研究では、水路を用いた模型実験を行い、その結果に基づいて、橋梁の津波安全性評価に用いる波力について考察した。得られた結論を列挙すると以下の通りである。

- ①津波が橋梁付近で砕波すると、極めて大きな衝撃波力が水平・鉛直方向に作用する。
- ②衝撃波力と支承・落橋防止構造の耐力とを比較してこれらの損傷程度を評価することは困難であり、より簡便な評価を行うことも考慮する必要がある。
- ③橋桁の移動量で比較すると衝撃波力より水平抗力の方が大きく、流失可能性の評価には水平抗力を考慮する必要がある。
- ④橋桁に作用する水平抗力は港湾基準式で上限が抑えられるため、港湾基準式により安全側の評価ができる。

今後はこれらの知見をもとに、津波による橋梁の安全性・被災度の評価手法について検討する予定である。

## 参考文献

- [1] 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol. 12, No. 3, pp. 31-69, 1973.
- [2] (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- [3] Unjoh, S.: Damage to transportation facilities, *The damage induced by Sumatra earthquake and associated tsunami of December 26, 2004*, pp. 66-76, <http://www.jsce.or.jp/committee/2004sumatra/report.htm>, 2005.
- [4] 水谷将, 今村文彦: 構造物に作用する段波波力の実験, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 946-950, 2000.
- [5] (社)日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1997.
- [6] Rabbat, B. G. and Russell, H. G.: Friction coefficient of steel on concrete or grout, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 111, No. 3, pp. 505-515, 1985.
- [7] (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2002.