

橋桁に作用する津波荷重の評価

庄司学¹・森山哲雄²

¹正会員 博(工) 筑波大学講師 大学院システム情報工学研究科(〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

²筑波大学大学院システム情報工学研究科(〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

1. はじめに

2004年12月26日(UTC 00:58:49)に発生したスマトラ島沖地震およびインド洋大津波の際には、家屋等の構造物の被害に加えて、港湾、道路、電力施設、上下水道施設等の社会基盤構造物に甚大な構造被害が発生した。その中でも、海岸線の極近傍に立地する橋梁構造物は津波作用力によって落橋や橋台の洗掘等の様々なパターンの被害を被った¹⁾。

このような橋梁構造物の津波被害を踏まえ、インド洋大津波以降、橋梁構造物に作用する津波荷重評価に係わる水理実験が多数の研究者によって実施されている^{2)~5)}。これらの中でも、庄司・森²⁾は津波作用によって生じる橋桁の移動(桁移動)という被害形態の再現実験を実施し、桁移動と津波流速ならびに浸水深さとの関係性について分析を行っている。しかし、前報では、抗力と浸水深さ等の関係性やそれらの結果の実橋への適用性に関して十分に分析しきれていないとは言えず、実験データの再吟味の余地を残している。

以上より、本研究では、庄司・森²⁾によって行われた水理実験(以下、庄司・森実験)において得られた実験データを活用して、これより得られた知見を踏まえた上で、橋桁に作用する津波荷重評価を行うこととする。

2. 分析対象データの概要

まず、分析対象とする実験データの概要について

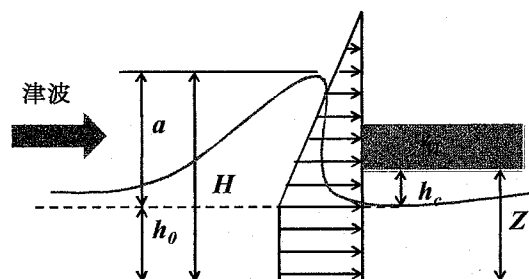


図1 橋桁に対する津波作用

述べる。当該実験は、スリランカにおける橋梁構造物の津波被害データを参照し、対象橋梁を単純桁橋に絞った上で、図1に示すような橋桁に対する津波作用を想定して、橋桁が橋台上の桁掛かりから横移動するという桁移動の被害形態をモデル化し、実験的に検証したものである。その際には、スリランカにおいて落橋もしくは桁移動が生じた1径間の桁橋の桁長、幅員、桁高を幾何学的に1/100で縮尺し、表1に示す13通りの桁模型を設計し、実験水路に設置した上で、貯水部水深 h_1 を変化させ、ゲート急開流れを発生させて津波を再現している。また、各桁模型に対しては、桁移動が生じる直前の状態まで津波高さ H を徐々に変化させて津波を作用させ、実験データとしては桁移動が生じるか、生じないかの閾値となる津波流速、および桁前面・背面の浸水深さを計測している。

桁模型および橋台模型は、コンクリート製であり、支承を有さない置き桁形式の橋桁としてモデル化されている。また、橋桁と橋台間の摩擦の状態を変化させるために、桁模型を橋台模型の上に置いただけ

表1 分析対象とする実験の諸条件(文献2に一部加筆)

水路番号	模型番号	桁長 L (mm)	幅員 B (mm)	桁厚 H (mm)	桁下高 Z (mm)	開度? (%)	貯水部 水深 h_1 (mm)	一様水深部 水深 h_2 (mm)	抗力係数 C_D (道路橋示方書)
1	1	50.35	28.00	5.70	11	75	40~100	13.1~18.2	1.61
	2	50.90	27.80	9.00	11	75	40~100	13.0~18.5	1.79
	3	50.85	54.70	5.10	11	75	40~120	13.1~18.6	1.30
	4	50.70	54.40	9.00	11	75	40~130	13.0~19.0	1.50
2	5	118.40	23.20	5.00	30	41	30~90	12.2~21.1	1.64
	6	117.95	46.30	5.50	30	41	50~110	12.3~21.7	1.30
	7	118.65	46.15	8.80	30	41	60~140	14.5~21.6	1.58
	8	117.80	69.30	6.25	30	41	60~120	14.4~20.7	1.30
	9	118.50	68.80	8.90	30	41	60~150	15.2~25.2	1.33
3	10	172.60	50.05	5.15	29	14	60~120	14.4~21.1	1.30
	11	173.10	49.75	10.10	29	13	70~170	14.3~21.1	1.61
	12	173.30	100.10	5.20	29	13	60~120	13.8~20.9	1.30
	13	173.80	99.90	10.00	29	13	70~160	14.4~21.6	1.30

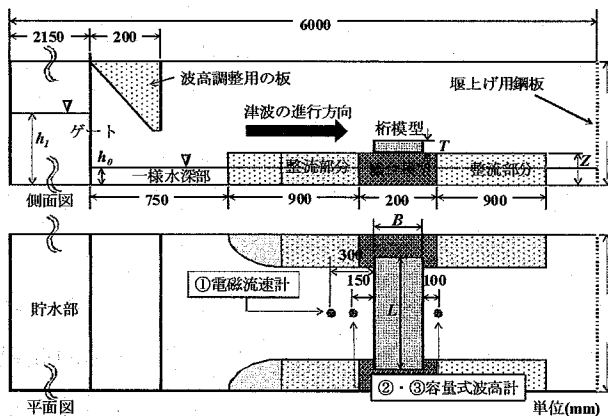


図2 実験水路の概要

のケースと、桁模型と橋台の間に粒度 150 の研磨紙を添付したケースの合計 2 ケースの実験を実施している。なお、これらの 2 ケースにおける静止摩擦係数は計測実験の結果より、各々、 $\mu_0=0.71$ と $\mu_1=0.80$ と求められている。

実験水路は図 2 に示すように長さが 6,000mm、幅が 200mm、高さが 195mm のアクリル製水路であり、水路には全長 2,150mm の上下式のゲートを有する貯水部を設置し、その横に波高調整板を接続することで、全長 3,850mm の一様水深部の水深の調整が行われている。また、一様水深部の水量を調整するために、水路下流端には堰上げ用の鋼板を設置し、これを 0~30mm の範囲で適宜、上下させ、調整している。橋台の前後 900mm の領域には水の流れを整流とするための区間を設けた上で、桁模型はゲート

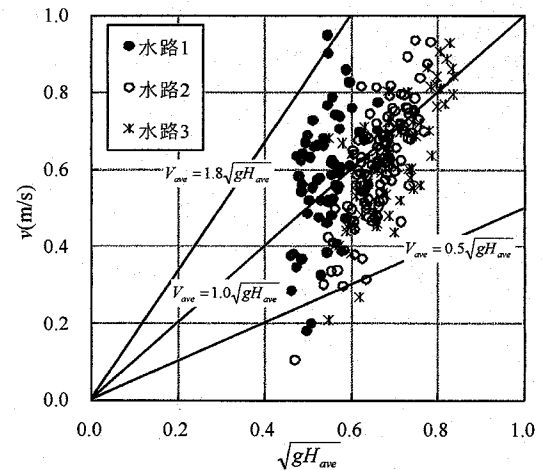


図3 5秒平均流速 v と5秒平均水深 H_{ave} の関係

から 1,750mm の位置に設置されている。なお、各桁模型に対する開度 λ は次式により定義される。

$$\lambda = (1 - \text{桁長 } L / \text{水路幅}) \times 100 \quad (1)$$

計測した物理量は桁模型の前面の津波流速と、桁前面および背面の浸水深さである。津波流速に関しては、図 1 の①の位置に電磁流速計(KENEK 製, VP2000)を設置して計測し、ゲートの開放から 5 秒間の平均流速 (5 秒平均流速 v) を計測している。また、浸水深さに関しては、図 1 の②および③の位置に容量式波高計(KENEK 製, CHT6-30)を設置し、1/500 秒のサンプリング間隔で、津波流速と同様に、ゲートの開放から 5 秒間の平均水深 (5 秒平均水深 H_{ave}) を計測している。

3. 津波高さと津波流速の関係、およびフルード数の位置づけ

図 3 には、桁前面の 5 秒平均流速 v と 5 秒平均水深 H_{ave} の関係を示す。これによると、庄司・森実験のフルード数 F_r は概ね 0.5~1.8 であることが明らかである。波浪実験の場合には、粘性の効果が重力の効果に比べて十分小さいという観点から、レイノルズ数 R_e は考慮せずに、フルード数 F_r を考慮して相似則を満足させればよいとされている⁹⁾。従って、実橋と桁模型の間で幾何学的相似が成立する場合には、フルード数 F_r に関して以下の相似を満足させればよいことになる。

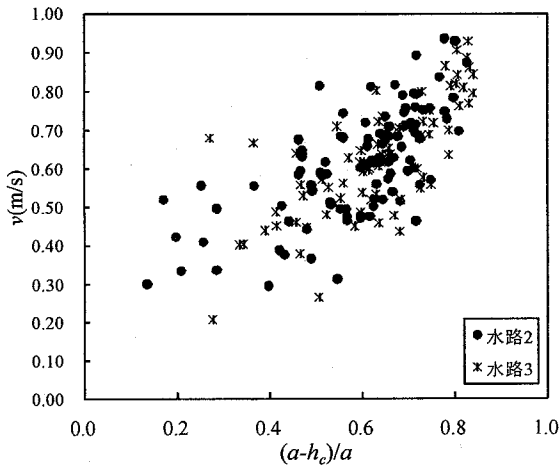


図 4 津波流速 v と橋桁に対する無次元化された浸水深さ $(a-h_c)/a$ の関係

$$F_r = \frac{v_p}{\sqrt{gH_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{gH_m}} \quad (2)$$

ここで、 v は津波流速、 g は重力加速度、 H は水深をそれぞれ表わし、下付きの p および m は実橋 (prototype) と桁模型 (model) に対応するそれらの諸量を表わすものとする。ゆえに、式(2)より次式が得られる。

$$\frac{v_p}{v_m} = \sqrt{\frac{H_p}{H_m}} \quad (3)$$

分析対象とする実験の幾何学的な縮尺は 1/100 であるので、式(3)に基づけば実験より得られる津波流速と実現象における津波流速との間の縮尺は次式のように考えることができる。

$$\frac{v_p}{v_m} \cong \sqrt{100} = 10 \quad (4)$$

よって、実橋に作用する津波流速 v_p は、対象とする実験で測定された流速 v_m のおよそ 10 倍と見なすことができる。

図 4 には、対象とする実験の水路 2 および水路 3 で計測された津波流速 v と橋桁に対する無次元化された浸水深さ $(a-h_c)/a$ (図 1 参照) との関係を示す。水路 1 に関しては、静水深 h_0 が桁下高 Z よりも高く、静水面－桁下間の高さ h_c が定義できなかったため、ここでは除外した。

図 4 の結果より、実現象においては、橋桁に対する無次元化された浸水深さ $(a-h_c)/a$ が 0.8 程度越えた津波は、流速 7m/s 以上で橋桁に作用すると考える

ことができる。

4. 流体力に関する相似則の適用と実験結果に対する解釈

次に、桁模型に作用する流体力と実橋に作用する流体力の相似を考慮するために、フルード数 F_r の相似則に加えて、桁重量 W に対する抗力 F_D の比 β に関する相似を実橋と桁模型との間で考慮する。

橋桁に作用する抗力 F_D および桁重量 W は、次式によりそれぞれ求められる。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D v^2 A \quad (5)$$

$$W = \rho_c V g \quad (6)$$

ここで、 ρ_w は海水の単位体積質量、 C_D は抗力係数、 A は桁の被水圧面積であり、 ρ_c は桁の単位体積質量、 V は桁の体積である。橋桁の抗力係数 C_D は、道路橋示方書⁷⁾によれば、桁の幅員 B および桁厚 T を用いて、以下のように求めることができる。なお、これより求められた桁模型の抗力係数 C_D を表 1 には併せて示す。

$$C_D = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/T) & 1 \leq B/T \leq 8 \\ 1.3 & 8 \leq B/T \end{cases} \quad (7)$$

以上より、桁重量 W に対する抗力 F_D の比 β に関する相似は次式のように求められる。

$$\beta \equiv \frac{\frac{1}{2} \rho_w C_{Dp} v_p^2 A_p}{\rho_p V_p g} = \frac{\frac{1}{2} \rho_w C_{Dm} v_m^2 A_m}{\rho_m V_m g} \quad (8)$$

ここで、式(8)の中の下付きの p および m は、式(2)～式(4)と同様に実橋 (prototype) と桁模型 (model) に対応するそれらの諸量を表わすものとする。桁の体積 V と桁の被水圧面積 A 、および幅員 B の間には、 $V = A \times B$ が成り立つので、式(8)は容易に式変形可能で、さらに、津波流速 v の比の 2 乗は幾何学的な尺度の比と式(3)のように同一となるので、式(8)は最終的に次式のようになる。

$$\frac{C_{Dp}}{\rho_p} = \frac{C_{Dm}}{\rho_m} \quad (9)$$

抗力係数 C_D はレイノルズ数 R_e の変化に対してお

よそ反比例の関係にある⁸⁾。従って、式(4)より本実験においては v_p は v_m よりも10倍大きくなるので、レイノルズ数 R_e に関しては $R_{ep} > R_{em}$ となり、その結果、厳密には抗力係数 C_D は $C_{Dp} < C_{Dm}$ となると考えられる。しかし、ここでは、実橋と桁模型の抗力係数は等しい($C_{Dp} = C_{Dm}$)と仮定する。このことは、相似則を介して模型実験によって得られた津波作用力を実橋に対する津波作用力に換算する場合に、実橋に対する津波作用力が大きく見積られることを意味する。従って、以降で得られる橋桁に対する津波作用力は津波荷重の観点から安全側の評価結果を与えると考えることができる。

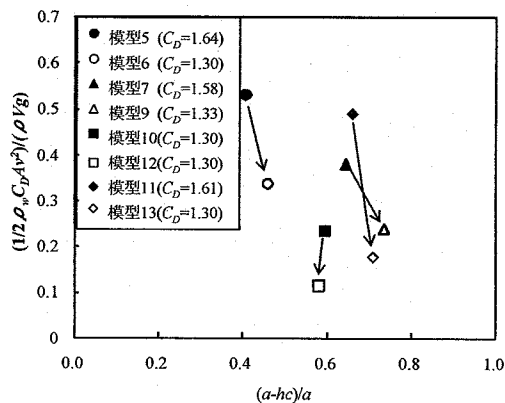
よって、実橋と桁模型の密度 ρ を次式のように合わせれば、桁重量 W に対する抗力 F_D の比 β に関する相似を満足させることができる。

$$\rho_p = \rho_m \quad (10)$$

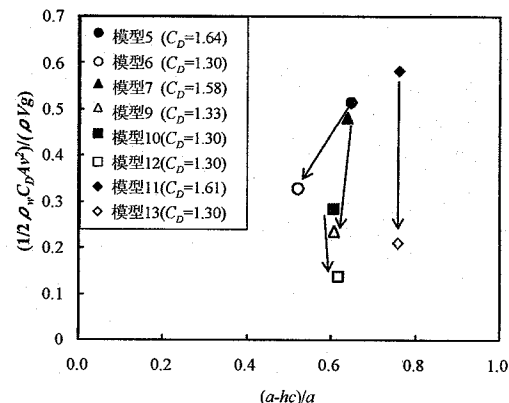
庄司・森実験では実橋と桁模型の密度 ρ は、鉄筋

コンクリート製とコンクリート製の相違はあるもののほぼ合致しているため、実験より得られたデータを解釈する際には、式(10)ならびに式(8)による相似を満足しているものと見なすことができる。

以上より、実験より得られた津波流速 v_m から桁模型に作用する抗力 F_{Dm} を求め、桁の重量 W_m によって無次元化した数値 β に関する評価を行った。図5ならびに図6は、 β と橋桁に対する無次元化された浸水深さ $(a-h_c)/a$ との関係性を示した結果である。図5では、桁長 L と桁厚 T は等しいが幅員 B の異なる2通りの実験値を同形で異色のプロットにより比較しており、図6では桁長 L と幅員 B は等しいが桁厚 T の異なる2通りの実験値を同じく同形で異色のプロットにより比較している。なお、前述したように、図5ならびに図6の全ての数値は、桁移動が生じるか生じないかの閾値を示しており、各々の実験で計測された数値において信頼度の高い2点の平均値を

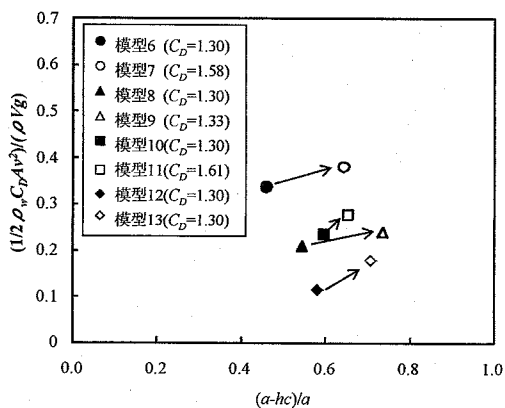


(a) $\mu=0.71$ の場合

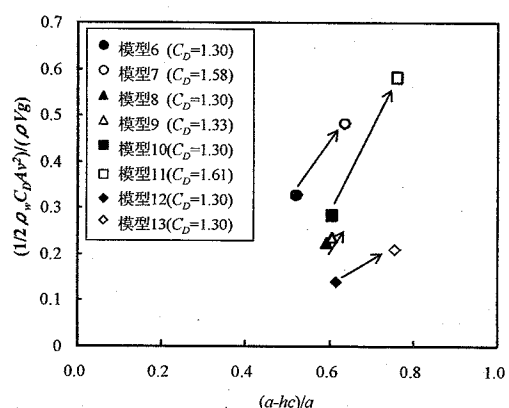


(b) $\mu=0.80$ の場合

図5 桁模型の幅員 B が変化した場合の β と $(a-h_c)/a$ との関係性

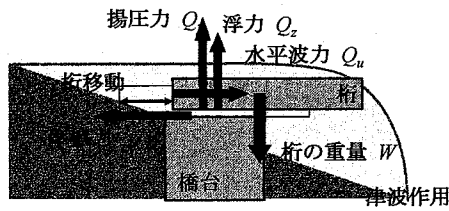


(a) $\mu=0.71$ の場合

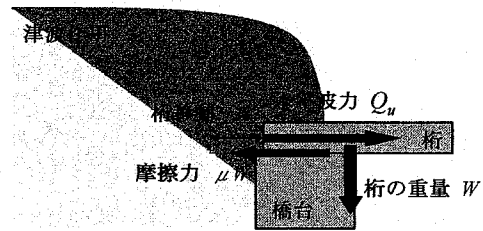


(b) $\mu=0.80$ の場合

図6 桁模型の桁厚 T が変化した場合の β と $(a-h_c)/a$ との関係性

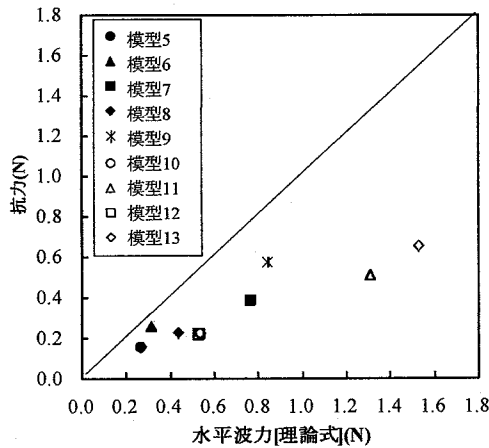


(a) 橋桁が流体力によって被害を受ける場合

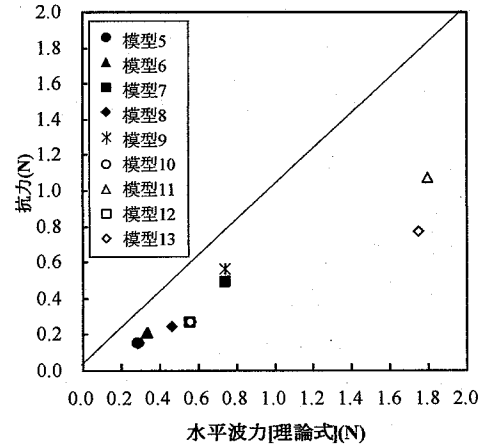


(b) 橋桁が衝撃的な水平波力によって被害を受ける場合

図7 橋桁に作用する津波作用力のメカニズム



(a) $\mu=0.71$ の場合



(b) $\mu=0.80$ の場合

図8 谷本ら⁹⁾の算定式に基づいて求められる水平波力と実験データより求められる抵抗力との比較

用いてプロットされた結果である。

図5によると、模型5と模型6、模型7と模型9、模型10と模型12、模型11と模型13との間の幾何学的な関係性において幅員 B が大きくなり、抵抗力係数 C_D が小さくなると、いずれの組み合わせに対しても $(a-h_c)/a$ がほとんど変化しない条件下で β の数値が大きく低下していることが明らかである。これは、抵抗力係数 C_D が小さくなると、図7に示すような橋桁に作用する津波作用力に対して抵抗力 F_D が相対的に小さくなるためであると考えられる。また、模型10と模型12との間の幾何学的な関係性のように、橋桁の形状寸法によっては β が0.2から0.1程度と著しく低い数値を示すことが明らかである。これらの桁模型は他の桁模型と比較して相対的に最も“薄い”橋桁であり、このような場合には図7(a)に示すように津波の流れ場において橋桁に作用する流体力の力の釣り合いから β が極小化しうると考えられる。

一方、図6によると、模型6と模型7、模型8と

模型9、模型10と模型11、模型12と模型13との間の幾何学的な関係性において桁厚 T が大きくなり、抵抗力係数 C_D が大きくなると、 β の数値は右上方向にシフトし、大きくなることが明らかである。これらの結果は、いずれの組み合わせにおいても、桁厚 T が大きくなると橋桁に対する無次元化された浸水深さ $(a-h_c)/a$ が相対的に大きな数値において桁移動が生じることを意味する。これより、桁厚 T が大きくなると、桁重量 W が大きくなる結果、図7(a)に示す津波の流れ場に基づいたメカニズムよりも図7(b)に示す津波の衝撃的な水平波力に基づいたメカニズムに基づいて桁移動が生じるためであると考えられる。

5. 既往の研究知見との整合性

谷本ら⁹⁾は、1/200の模型縮尺実験による結果に基づいて、次式に示すような直立壁に働く津波波力の算定式を提案している。

$$p_I = 2.2\rho g a_I \quad (11)$$

ここで、 ρ は流体の単位体積質量であり、 a_I は入射する津波の静水面からの高さである。波圧の分布形状としては、静水面上の高さ $\eta^*(=3.0a_I)$ において $p=0$ 、静水面の高さにおいて $p=p_I$ となるような(図1参照)三角形分布を仮定している。なお、谷本らの算定式は、入射波高 H_I を $H_I=2a_I$ とすれば、合田¹⁰⁾によって提案されている式の長波長側の極限をとった式と同一となる。

片岡ら³⁾は、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においても式(11)が適用可能であることを実験的に検証している。よって、これらの既往研究の知見を踏まえ、本研究においても式(11)に基づき、5秒平均水深 H_{ave} を用いて求められる水平波力と、5秒平均流速 v を用いて求められる抗力とを比較すると図8のようになる。これによれば、谷本らによる算定式に基づいて求められた水平波力は、実験より求められる橋桁の抗力の上限を抑えており、谷本らによる算定式により橋桁の抗力の安全側の評価が可能であると言える。しかし、橋桁に対する津波作用力は、水平波力の他にも浮力や揚圧力が作用すると考えられるため、今後はこれらの定量的な評価を行っていく予定である。

6. まとめ

本研究では、庄司・森²⁾によって行われた橋桁の津波被害再現実験において得られた実験データを活用して、橋桁に作用する抗力と浸水深さ等の関係性やそれらの結果の実橋への適用性に関する検討を行い、橋桁に作用する津波荷重評価を行った。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 橋桁の幅員 B が相対的に大きくなると、橋桁に対する浸水深さ $(a-h_c)/a$ がほとんど変化せずに桁重量 W に対する抗力 F_D の比 β が大きくなり低下する。これは、橋桁の抗力係数 C_D が相対的に小さくなり、橋桁に作用する津波作用力に対して抗力 F_D が相対的に小さくなるためである。また、

橋桁の形状が極めて薄くなると β が0.2から0.1程度と著しく低くなる場合があり、対津波設計において十分な注意が必要である。これは、津波の流れ場において橋桁に作用する流体力の力の釣り合いから β が極小化する場合があることを意味する。

- 2) 橋桁の桁厚 T が大きくなると、 β は右上方向に大きくなり、橋桁に対する浸水深さ $(a-h_c)/a$ が相対的に大きな数値において桁移動が生じる。これは、橋桁の桁重量 W が大きくなる結果、津波の流れ場に基づいたメカニズムよりも津波の衝撃的な水平波力に基づいたメカニズムに基づいて桁移動が生じるためであると考えられる。

参考文献

- 1) 庄司学・森山哲雄：2004年インド洋大津波の津波作用を受けた道路構造物に対する被災分析，第10回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.115-120，2007.2.
- 2) 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，土木学会，pp.801-805，2006
- 3) 片岡正次郎・日下部毅明・長屋和宏：津波衝突時に橋桁に作用する波力，第12回日本地震工学シンポジウム，pp.154-157，2006.
- 4) Iemura, H., Pradono, M. H., Yasuda, T. and Tada, T. : Experiments of Tsunami Force Acting on Bridge Models, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.902-911, 2007.8.
- 5) 荒木進歩・中島悠・田中邦彦・出口一郎・伊藤禎和：橋桁に作用する津波流体力に関する実験的研究，土木学会第62回年次学術講演会，pp.535-536，2007.9.
- 6) 須賀堯三編著：水理模型実験，山海堂，1990.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編，1996.
- 8) 吉川秀夫：水理学，技報堂出版，1976.
- 9) 谷本勝利・鶴谷広一・中野晋：1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討，第31回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp.257-261，1984.
- 10) 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.