

橋梁に対する津波荷重の設定に関する基礎的検討

竹田周平¹・幸左賢二²・二井伸一³・原田紹臣⁴・藤田亮一⁵・黒岩俊之⁶

- ¹正会員 博（工）福井工業大学 講師 工学部建設工学科（〒910-8505福井県福井市学園3-6-1）
²正会員 Ph.D. 九州工業大学 教授 工学部建設社会工学科（〒804-8550北九州市戸畑区仙水町1-1）
³正会員 株式会社ウエスコ 岡山支社設計部構造設計課（〒700-0033岡山市島田本町2-5-35）
⁴正会員 三井共同建設コンサルタント株式会社 関西支社 防災室
（〒552-0007 大阪市港区弁天町1-2-1-1000号）
⁵正会員 日本技術開発株式会社 リサーチエンジニアリング事業部（〒531-0072 大阪市北区豊崎5-6-10）
⁶正会員 東急建設株式会社 土木総本部土木設計部（〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14）

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日、インドネシア西部スマトラ島北西沖のインド洋でマグニチュード 9.3 の地震が発生した。この地震により沿岸地域に巨大津波が発生したことで、道路やライフライン、また建築構造などに甚大な被害が発生した。国内に着目すると、現在東海や東南海地震による津波被害が懸念されている。しかしながら、橋梁と津波との相関関係に着目した研究は未だ十分と言い難い状況にあり、今後も断続的で迅速な研究の推進が不可欠である。

近年における既往研究では、二井ら¹⁾は橋梁を対象に、津波による上部構造の移動現象に着目し、個別要素法に基づく数値解析を行った。その結果、上部構造の重量と摩擦係数の積で算定される抵抗力以上の作用力が生じた場合に移動現象が生じること、移動距離と移動速度は簡易式で評価が可能である結果を得ている。杉本ら²⁾は、津波による橋梁の流出被災メカニズムを解明することを目的として、RC 橋と鋼橋のそれぞれ 1 橋を対象に水理実験を実施した。この結果、津波が上部構造に衝突したときの抗力と揚力など津波外力の特徴や、津波高さ・水深と抗力・揚力との相関関係や、これらと実際に被害を受けた橋梁との関係について整理した。また庄司ら³⁾は、インド洋で発生した橋梁構造物の津波被害に鑑みいくつかの水理実験に着目し、津波作用によって生じる桁移動の被害形態を把握するための再現実験を行った。この結果、幅員が相対的に大きくなると桁重量に対する抗力の比が低下するなどの結果を得ている。しかしながらこれらは、橋梁と津波による作用力との相関関係を明確にするまでには至っていない。このため、水理実験等により橋梁に作用する荷重を実験的に検討すると共に、近年予測されている海溝型巨大地震の予測を踏まえると、設計実務

上必要となる設計式の誘導を迅速に行うことが急務である。以上より本研究は、現在津波荷重が設定されている各種基準の内容を調査し、橋梁への作用力を設定するための基礎資料を得ることを目的とする。

2. 調査概要

(1) 対象となる文献・基準

本研究で対象となる文献・基準は、国内外の基準の中でも近年の研究成果を取り入れられたものを中心に調査する。特に、津波荷重が作用する沿岸に位置する構造物、すなわち港湾施設の基準や、建築物、原子力施設に加え、海外での基準等も含めて選定を行った。表-1に調査対象となる文献の一覧を示す。

表-1 調査対象文献

文献・基準	著者等
津波に対する建築物の構造設計法について－その2：設計法（案）－ ⁴⁾	岡田恒男ら
港湾の施設の技術上の基準・同解説 ⁵⁾	(社) 日本港湾協会
Constal Construction Manual ⁶⁾	FEMA55 Third Edition
原子力発電所の津波評価技術 ⁷⁾	(社) 土木学会 原子力土木委員会

(2) 調査の着眼点

文献の調査について、設計手法に違いがあり単純な比較を行うことができない。例えば、性能照査型での設計手法と従来からの手法を同じ観点で対比す

ることが難しい。このため、各項目ごとにどのような数式として与えられているのか、数式の誘導根拠などが明確となっている場合はその背景なども調査し、整理を行う方法とした。

3. 各種設計基準の内容と考察

(1) 建築構造物に関する基準

建築構造物の設計法⁴⁾では、機能の研究成果を総合して、建築物に作用する津波波圧や波力を定量的に評価し、その外力に対する建築設計法を提案している。しかしながら、遡上した津波が建築物に与える影響についての研究は多くなく、また建物の受圧面の窓ガラス等が破壊された場合の波力の影響については未だ不明な点が多いため、安全側の評価として波圧や波力を用いている点は、今後の研究に期待するとの指摘もある。なお、この設計法（案）の策定については、津波に関する研究分野が多い、港湾関係、東北大学の今村文彦教授や防衛大学の藤間功司教授からの技術指導、さらには原子力施設関係の技術も取り入れて反映されたものであり、橋梁の設計分野に対し非常に参考になるものと考えられる。

まず最初に、津波波圧の算定式について説明する。式(1.1)に設計用の進行方向の津波波圧算定式を示す。また図-1に設計波圧の概念図を示す。

$$q_x = \rho g(3h - z) \quad (1.1)$$

ここに、

q_x : 津波波圧 (kN/m^2)
 ρ : 水の単位体積重量 (t/m^3)
 g : 重力加速度 (m/sec^2)
 h : 設計用浸水深(m)
 z : 当該部分の地盤面からの高さ ($0 \leq z \leq 3h$) (m)

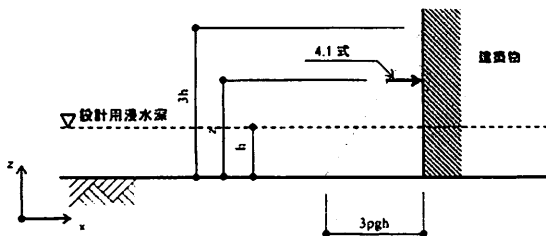


図-1 津波波圧の概念図

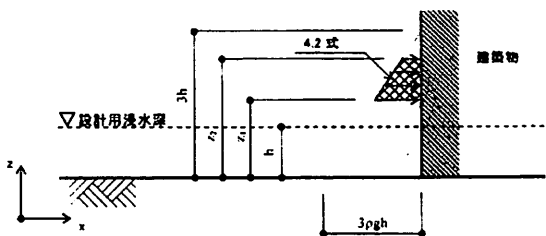


図-2 津波波力の概念図

(図中の4.1式は式(1.1)を、また4.2式は式(1.2)を示す。)

また、構造設計用の進行方向に対する津波波力は、式(1.1)の津波波圧が同時に作用すると仮定し、下記式(1.2)で与えられている。また図-2に設計波力の概念図を示す。

$$Q_x = \rho g B \int_{z_1}^{z_2} (3h - z) dz \\ = \frac{1}{2} \rho g B \left\{ (6hz_2 - z_2^2) - (6hz_1 - z_1^2) \right\} \quad (1.2)$$

ここに、

Q_x : 構造設計用の進行方向の津波波力 (kN)
 ρ : 水の単位体積重量 (t/m^3)
 g : 重力加速度 (m/sec^2)
 B : 当該部分の幅(m)
 z_1 : 受圧面の最小高さ ($0 \leq z_1 \leq z_2$) (m)
 z_2 : 受圧面の最小高さ ($0 \leq z_2 \leq 3h$) (m)

なお、これらの設計式を設定した理由としては、既往の提案式をいくつか抽出して比較を行って考察を述べている。比較した数式を式(a)～(e)に示す。この結果、同じ遡上水深で比較した場合に加わる津波荷重は、各式との同程度である結果を得た。このため、簡便な式である式(1.1)を採用した背景がある。

(a) ソリトン分裂しない陸上浸水津波の波圧算定式

$$P_m(z) = \rho g(3\eta_{\max} - z) \quad (a)$$

ここに、

P_m : 最大津波波圧 (kN/m^2)
 ρ : 流体の密度 (t/m^3)
 g : 重力加速度 (m/sec^2)
 $\eta_{\max}$: 最大遡上水深 (m)
 z : 陸上地面を基準とした上向き正の座標 (m)

(b) 顕著なソリトン分裂を伴う陸上浸水津波の波圧算定式

$$P_m(z) = \max(5.4\eta_{\max} - 4z, 3\eta_{\max} - z) \rho g \quad (b)$$

ここに、

P_m : 最大津波波圧 (kN/m^2)
 ρ : 流体の密度 (t/m^3)
 g : 重力加速度 (m/sec^2)
 $\eta_{\max}$: 最大遡上水深 (m)
 z : 陸上地面を基準とした上向き正の座標 (m)

(c) ソリトン分裂しない碎波段波津波の波圧算
定式

$$p_m(z) = 2.2 \left(a_H - \frac{z}{3} \right) \alpha \rho g \quad (c)$$

ここに、

P_m : 最大津波波圧 ($0 \leq z/a_H \leq 3$)
(kN/m^2)

ρ : 流体の密度 (t/m^3)

g : 重力加速度 (m/sec^2)

a_H : 進行津時の津波段波振幅 (m)

α : 碎波による衝撃段波波圧の割増係数
(=1.36)

(d) 陸上浸水津波の水平波力算定式

$$F_H = \frac{1}{2} \rho C_D u |u| B \eta + \rho C_M \dot{u} B L \eta + \frac{1}{2} \rho C_s(\theta) u |u| B \eta + \rho g B L \eta \frac{d\eta}{dx} \quad (d)$$

ここに、

F_H : 水平波力(kN)

B : 構造物の幅(m)

ρ : 流体の密度 (t/m^3)

C_D : 抗力係数 (=2.05)

C_M : 質量係数 (=2.19)

$C_s(\theta)$: 衝撃力係数 (=3.6tan θ)
(θ : 波面の角度)

u : 津波の速度(m/s)

g : 重力加速度 (m/sec^2)

η : 津波進行波の浸水深(m)

(e) 陸上浸水津波の水平波力算定式

$$F_{DH} = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 h_f B_f \quad (e)$$

ここに、

F_H : 水平波力(kN)

ρ : 流体の密度 (t/m^3)

g : 重力加速度 (m/sec^2)

C_D : 抗力係数 (=1.1~2.0)

u : 津波の速度(m/s)

h_f : 家屋前面浸水深(m)

B_f : 構造物の浸水部の幅(m)

さらに津波の水平力については、遡上域にける障害物の状況に応じて低減できるとものとされている。また津波の荷重方向については、シミュレーション

等の浸水深の予測分布などより想定できない場合は、すべての方向から作用させると規定され、状況に応じて引き波を考慮すると与えている。

最後に、浮力の算定について説明する。式 (3) に浮力の算定式を示す。この式は静水力学における水深差から発生する揚力を表したものである。なおこの理論式は静水圧の状態であり、側面の水圧は同じであるため、あくまでも上下方向の圧力差に着目したものととなっている。

$$Q_z = \rho g V \quad (3)$$

ここに、

Q_z : 浮力 (kN)

ρ : 流体の密度 (t/m^3)

g : 重力加速度 (m/sec^2)

V : 津波に浸かった建築物の体積(m^3)

(2) 港湾構造物に関する基準

港湾の施設の技術上の基準・同解説⁵⁾ は平成19年度に大幅な改訂があり、仕様規定型から性能照査型になった。このため照査方法は限界状態設計法による検討となることから直接的な比較は難しいが、波圧や波力との関係、津波の作用高さ等について説明する。式(4)に静水面上の波圧作用高さを示す。また図-3に津波波力の概略図を示す。ここに示す a_I は直立壁への入射津波の静水面上からの高さであり、波圧の作用高さはこの a_I の3倍でとることが判る。またこのときの静水面上の波圧強度は式(5)で与えられている。なお静水面以下の波圧は、式(5)で与えられた波圧が一様に分布した状態を考慮している。

$$\eta^* = 3.0 a_I \quad (4)$$

$$p_I = 2.2 p_o g a_I \quad (5)$$

ここに、

η^* : 静水面上の波圧作用高さ(m)

a_I : 入射津波の静水面上の高さ
(振幅) (m)

ρ : 流体の密度 (t/m^3)

g : 重力加速度 (m/sec^2)

p_I : 静水面における波圧強度 (kN/m^2)

$$p_u = p_I \quad (6)$$

ここに、

p_u : 前面下端における揚圧力 (kN/m^2)

p_I : 静水面における波圧強度 (kN/m^2)

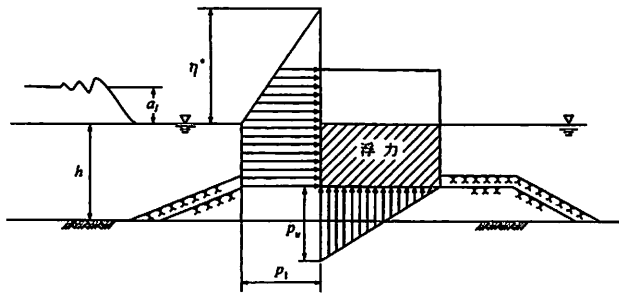


図-3 津波波力の考え方

また式(6)に防波堤に作用する揚圧力の算定式について示す。これは、静水面で作用する波圧強度相当の水平方向の荷重と同じ荷重が下端に作用し、その底面の反対では、 $p_u=0$ となる三角形分布と与えられている。津波の設定に着目すると、当該地域で起こりうる最大規模の想定津波に対する施設の安全性や防護性能等を評価することが重要である観点より、適切な数値計算の採用、模型実験等によるシミュレーションに基づく津波高や遡上高などを設定すると与えられている。

建築分野での提案式と比較すると、静水面上と地盤面上としての基準とする位置は異なるものの、概ね同様な算定式であることが判る。

(3) FEMA55に関する基準

Constal Construction Manual⁶⁾は、FEMA (Federal Emergency Management Agency) が2000年に公表した海岸付近における建物のための自然災害対策マニュアルである。ここでは、沿岸地域の設計に対して、静水力、動水力、浮力、砕波、衝撃力及び津波に対して計算式が与えられている。津波に着目すると、その他の洪水よりも規模が大きいと規定されている。式(7)に津波流速の算定式を示す。この算定は、洪水による流速の中でも極めて大きいもの(Extreme)と定義されている。津波以外の洪水は、下限値が式(8)で、また上限値が式(9)として与えられている。これにより、津波による流速は、その他の洪水の上限値(式(9))の2倍であることが判る。これらの流速と設計用静水深と相関関係を図-4に示す。なお、ここに示す長さの単位はfeetである。

$$v = 2.0\sqrt{gd_s} \quad (7)$$

$$v = d_s / t \quad (8)$$

$$v = \sqrt{gd_s} \quad (9)$$

ここに、

v : 洪水の流速(ft/sec)

g : 重力加速度 (=32.2) (ft/sec²)

d_s : 設計用静水深 (ft)

t : 1sec

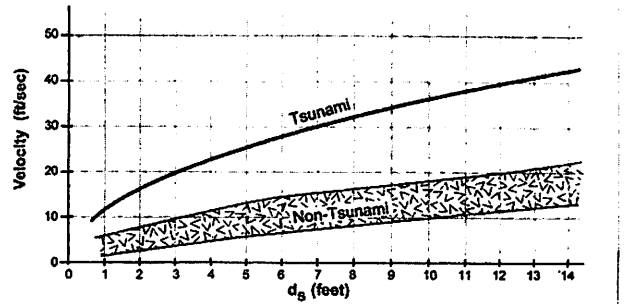


図-4 設計用静水深と流速との関係

続いて水平方向の静水圧について説明する。式(10)に水平方向の静水圧の算定式を示す。ここでは、日本と長さの単位や最大静水圧の大きさに違いがあるものの、国内における考え方と大きな相違はないと考えられる。

$$f_{sta} = \frac{1}{2} \gamma d_s^2 \quad (10)$$

ここに、

f_{sta} : lb単位幅当たりの静水圧(lb/ft)

γ : 流体の単位体積重量

(水=62.4lb/ft³, 海水=64.0 lb/ft³)

d_s : 設計用静水深 (ft)

揚力については、単位に相違があるが式(3)と同様な計算式で与えられている。式(11)に揚力の算定式を示す。基本的に、流体で置き換えられた体積に相当する浮力相当として評価している。なお長さの単位はfeetである。

$$F_{buoy} = \gamma(Vol) \quad (11)$$

ここに、

F_{buoy} : 鉛直方向静水圧(揚力) (lb)

γ : 流体の単位体積重量

(水=62.4lb/ft³, 海水=64.0 lb/ft³)

Vol : 流体で置き換えられた体積 (ft³)

砕波荷重については、杭などのような線状構造と壁などの鉛直壁別に数式が与えられている。線状構造物の場合では、基本的に式(10)と構成は同じであるが、砕波係数 C_p による補正が行われている。例えば、円形の様な形状に場合では1.75、角形の様な形状の場合では2.25と設定されている。ただし、砕波の波高については、設計用静水深 d_s の78% ($0.78 \times d_s$) と与えられている。また鉛直壁の構造では、動的な衝撃を考慮するための係数 C_p を考慮している。これらは、建築物の形式によってことなるが、1.6~3.2の範囲で与えられている。

また動水圧では、流速が10ft/sec以上と以下でそれぞれ異なる評価となっており、浮遊物による衝撃力が試算できない場合は、1,000×lbを考慮すると与えられていることが特徴である。

(4) 原子力発電所施設に関する基準

原子力発電所施設分野では、（社）土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会により、原子力発電所の津波評価技術⁷⁾が提案されている。この文献では、防波堤及び敷地内陸上構造物に作用する津波波力については、ソリトン分裂を考慮した段波津波の波圧評価算定式が提案されている。式（12）及び式（13）にソリトン分裂しない場合の直立壁に作用する段波津波の最大津波波圧と、顕著なソリトン分裂を伴う最大津波波圧を示す。

式（12）については、式（12-1）は静水面上を、式（12-2）は静水面下の場合を示す。また式（13）については、式（13-1）は重複波時の段波高より上を、式（13-2）は重複波時の段波高より下の場合を示す。

これらの波圧算定式より、顕著にソリトン分裂を伴う場合は、ソリトン分裂を伴わない場合に比較し作用高さが2.0倍に、また最大波圧は1.6倍になることを示している。

$$\frac{P_{m1}(z)}{\rho g a_H} = 2.2 \left[1 - \frac{z}{3a_H} \right] \quad \left[0 \leq \frac{z}{a_H} \leq 3 \right] \quad (12-1)$$

$$\frac{P_{m1}(z)}{\rho g a_H} = 2.2 \quad \left[\frac{z}{a_H} \leq 0 \right] \quad (12-2)$$

ここに、
 P_{m1} ：ソリトン分裂しない場合の段波津波の最大津波波圧（kN/m²）
 ρ ：流体の密度（t/m³）
 g ：重力加速度（m/sec²）
 z ：陸上地面を基準とした上向き正の座標（m）
 a_H ：進行波時の津波段波振幅（m）

$$\frac{P_{m2}(z)}{\rho g a_H} = 3.5 \left[2 - \frac{z}{3a_H} \right] \quad \left[3 \leq \frac{z}{a_H} \leq 6 \right] \quad (13-1)$$

$$\frac{P_{m2}(z)}{\rho g a_H} = 3.5 \quad \left[\frac{z}{a_H} \leq 3 \right] \quad (13-2)$$

ここに、
 P_{m2} ：顕著なソリトン分裂を伴う場合の段波津波の最大津波波圧（kN/m²）

表-2 文献調査等によるレビュー（案）

津波外力	対象	適用の可能性 (国総判断)	式	対象	レビュー資料
波圧・波力	津波	◎	合田式	沿岸に建設された堤防	港湾の施設の技術上の基準・同解説
		◎	朝倉式	沿岸に建設された建物（津波避難ビル）	津波に対する構造物の構造設計法
		○	池野ら	段波を受ける構造物	原子力発電所の津波評価技術
	平均波	△	広井公式	深い水深の橋脚	道路橋示方書
	津波	—	提案式	橋梁	筑波大・九工大からの資料
洗掘	河川流	△	Andru他	最大洗掘深さと橋脚幅の関係式	水理公式集
揚圧力	重複波	△	合田式	水面付近の水平板	港湾の施設の技術上の基準・同解説
	重複波	△	伊藤・竹田ら	栈橋	港湾の施設の技術上の基準・同解説
	津波	—	提案式	橋梁	九工大からの資料
浮力	津波	—	合田式	沿岸に建設された堤防	港湾の施設の技術上の基準・同解説
		◎	朝倉式	沿岸に建設された建物（津波避難ビル）	津波に対する構造物の構造設計法
		—	池野ら	段波を受ける構造物	原子力発電所の津波評価技術
衝突力	津波	○	松富	流木の縦衝突を対象	原子力発電所の津波評価技術
		○	池野ら	各種形状漂流物の衝突力と衝突応力	原子力発電所の津波評価技術
	平均波	△		流木その他の流屑物の衝突	道路橋示方書

4. まとめ

本研究では、津波荷重が設定されている各種基準の内容を調査し、橋梁への作用力を設定するための基礎資料を得ることを目的とした調査を中心とした検討を行った。検討の内容は、ここに示した指針の説明が主であり、今後のより一層の内容の充実や追加調査、また実験的研究や解析的研究の成果を十分に考慮し、橋梁に作用する波圧・波力の算定を明らかにすべきと考える。

本研究の調査結果より、橋梁を対象にした設計式と考え方の総評（案）を表-2に示す。これは、現段階における調査成果に基づいた総評（案）を示したものであり、改良・修正していく予定である。

謝辞：本研究は、地震時保有耐力法に基づく耐震設計法研究小委員会の津波設計WGの活動の一部をとりまとめたものである。文献の整理や各基準に対する資料を提供頂きました委員の皆様にごに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 二井伸一，幸左賢二，運上茂樹，庄司学：津波による橋梁被害の解析的検討，第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.81-88，2008.1.
- 2) 杉本 健，運上茂樹：津波による橋梁の被害メカニズムに関する実験的研究，第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.97-100，2008.1.
- 3) 庄司 学，森山哲雄：橋桁に作用する津波荷重の評価，第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.225-230，2008.1.
- 4) 岡田恒男，管野忠，石川忠志，扇丈朗，高井茂光，浜辺千佐子：津波に対する建築物の構造設計法について－その2：設計法（案）－，ビルディングレター，（財）日本建築センター，pp.1-8，2004.11.
- 5) （社）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 6) Federal Emergency Management Agency：Chapter 11：Determining Site-Specific Loads，*Coastal Construction Manual*，pp. 11-36，2000.
- 7) （社）土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術，2002.