

# 津波の影響を考慮した PC 道路橋の構造形式の検討

植村 典生\*1・古村 豊\*2・大山 博明\*3・幸左 賢二\*4

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、沿岸都市部において巨大津波により甚大な被害が発生した。道路構造物においては、多数の橋梁が津波により損傷、流出し、震災後の被災地への救援活動や復旧活動に遅れを生じさせた。昨今、南海トラフ巨大地震の発生が予想されるなか、今後は津波に強い橋梁の誕生が望まれるところである。これまでの道路橋の設計においては、設計荷重に津波荷重を考慮していないことが一般的であり、津波に対する構造的な配慮もなされていなかった。

このため、震災翌年の平成 24 年に改訂された道路橋示方書では、津波に対する構造的な配慮が必要などの記述が加えられたものの、その具体的な検討手法については言及されていない。そこで本検討では、PC 道路橋を対象として構造的配慮により津波抵抗性の高い構造形式を考案することを目的として、既往の津波荷重算定式を用いて静的構造解析を行い、津波の影響を考慮した PC 橋梁の検討を実施した。

キーワード：津波、PC 道路橋、構造形式

## 1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に東北地方三陸沖の牡鹿半島東南東 130 km を震源とする東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震は M9 の大地震であり、この地震により東北地方沿岸部には巨大津波が襲来した。気象庁の報道発表によれば、津波観測施設が被害を受け、津波高さが欠測していたことから、津波の痕跡などより実際の津波高さを推定して発している。この報道発表によれば津波の高さは、6.2 ～ 11.8 m と発表された<sup>1)</sup>。この巨大津波により、沿岸都市部は建築物、インフラなどに壊滅的な被害が発生した。道路橋や鉄道橋においても被害が甚大であり、多数の橋梁が損傷、落橋、流出した。

道路橋や鉄道橋などのインフラの消失は、地震後の被災地への救援活動や災害復旧に遅れを生じさせ、2 次的被害を生じさせる原因となる。

これまでわが国の橋梁の設計では、外力に津波の影響を考慮しないことが一般的であったが、今後は防災計画、重要度の高い橋梁においては、設計荷重に津波の影響を考慮する必要があると考えられる。そこで本稿では、設計荷重に津波の影響を考慮した PC 道路橋の検討を実施した。

## 2. PC 道路橋の津波被害と橋梁形式の提案

### 2.1 PC 道路橋における津波被害

東北地方太平洋沖地震の津波による PC 上部構造の流出被害は、T 桁断面などの開断面構造において多く発生した。

写真 - 1 は津波により PC 上部構造が流出した代表的な

事例の歌津大橋である。本橋の構造形式は、プレテンションおよびポストテンション方式による 12 径間単純 PCT 桁橋である。本橋では 12 径間のうちの 8 径間の上部構造が津波により流出した。幸左らは、本橋の津波襲来時の映像の分析と数値解析の結果から、本橋の上部構造の流出メカニズムについて、上部構造浸水後の浮力の影響による可能性が高いことを推論している<sup>2)</sup>。

PC 技術協会（現 PC 工学会）の PC 橋の津波被害調査報告<sup>3)</sup>によれば、PCT 桁橋は浸水後に桁間に空気が残留した場合、上部構造の見掛けの比重が小さくなり、スラブ桁断面などの床版端に比べて上部構造の流出の危険性が高くなることが報告されている。

また、張らは、津波作用力に及ぼす上部構造の構造形式

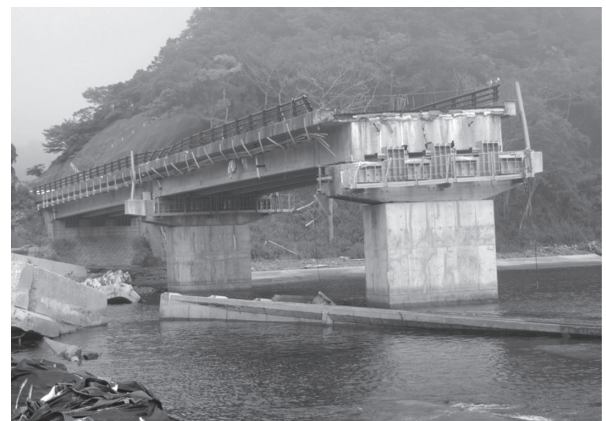


写真 - 1 PC 道路橋の被害事例

\*1 Norio UEMURA：(株)ピーエス三菱 技術本部 開発メンテナンスグループ

\*2 Yutaka KOMURA：(株)ピーエス三菱 技術本部 土木技術グループ

\*3 Hiroaki OHYAMA：(株)ピーエス三菱 技術本部 技術部 部長

\*4 Kenji KOSA：九州工業大学 教授

の影響を実験的に評価しており、張出し床版を有する上部構造断面に比べて、張出し床版のない床版橋では、津波による作用力が低くなることを報告している<sup>4)</sup>。

これらの調査・研究から、T桁断面などの開断面や張出し床版を有する上部構造断面では、津波により上部構造が流出する可能性が高くなることが推論される。

## 2.2 橋梁の構造形式の提案

### 2.2.1 構造計画方針

津波による上部構造の流出は、津波荷重が上部構造に作用することにより生じる。このため、津波による上部構造の流出を防止するためには、上部構造の高さを、津波が上部構造に到達しない高さとするのが望ましい。そこで本検討における設計方針を以下のとおりとした。

- ① 上部構造の計画高さを、津波の設計浸水深以上とすることで、津波を上部構造に直接作用させない。
- ② 想定外に設計浸水深以上の津波が襲来して、津波が上部構造に直接作用した場合においても落橋を防止する。

### 2.2.2 構造形式の考案

前項の設計方針をもとに本橋の構造形式を5径間連続ラーメンPCスラブ桁橋とした。図-1に構造概要図を示す。

本検討では、津波に対して表-1に示すような構造的な配慮を行うことで、橋梁全体の津波抵抗性を向上させて、上部構造に津波が直接作用した場合においても落橋を防止させることを目的として構造計画を行った。

本構造の特徴は、①上部構造に津波抵抗性の高いPCスラブ桁を用いたこと、②橋脚に円形断面のRC橋脚を採用して水の抵抗を低減したこと、③すべての上部構造支持点にラーメン構造を採用したこと、などがあげられる。

## 3. 津波襲来時の設計荷重

### 3.1 津波襲来時に作用する荷重

津波襲来時に橋梁に作用すると考えられる外力は、津波

荷重による水平力、上揚力、浮力、漂流物の衝突力などが考えられる。道路橋示方書では、これらの荷重について明確には言及されていないため、本検討ではいくつかの既往の荷重算定式を用いて検討を行った。本検討でのこれらの荷重の取り扱いについて以下に詳述する。

### 3.2 設計荷重の設定

先般、建築構造物においては、津波荷重の設定方法について国土交通省より指針<sup>6)</sup>が提示された。一方、橋梁については、研究報告はきわめて少なく、津波荷重に対する設計手法は明確化されていない。そこで本検討では種々の既往の津波荷重算定式を用いて津波襲来時の外力を評価した。

#### 3.2.1 津波による水平力

本検討では、以下に示す3つの既往の津波荷重算定式を用いて津波荷重による水平力を算出した。なお、本検討では、以下に示す3式のうち作用力が最大となる式(1)の津波の水平荷重を適用した解析結果について報告する。

#### (1) 静水圧式

本式は津波の水平荷重を静水圧と仮定した算出式であり、文献<sup>6)</sup>を参考とした。なお、本式は建築構造物のように連続壁体に作用することを前提としたものであると考えられるため、本式を橋梁構造物にそのまま適用できない。このため本検討では本式に構造物の形状に基づく抵抗係数 $C_d$ <sup>7)</sup>を考慮した。

$$qz = \rho g (ah - z) C_d \quad (1)$$

ここに、津波の水平波圧 $qz$ (kN/m<sup>2</sup>)、水の密度 $\rho$ (t/m<sup>3</sup>)、重力加速度 $g$ (m/s<sup>2</sup>)、水深係数 $a$ 、浸水深 $h$ (m)、桁下高さ $z$ (m)、抵抗係数 $C_d$ を示す。なお、水深係数 $a$ は、橋梁設置位置を考慮して文献<sup>6)</sup>を参考として2.0とした。津波の水平荷重の算定に用いた浸水深 $h$ は、設計浸水深時の8.750mと、想定外浸水時として設計浸水深時の1.5倍の高さとなる13.125mの2ケースとした。

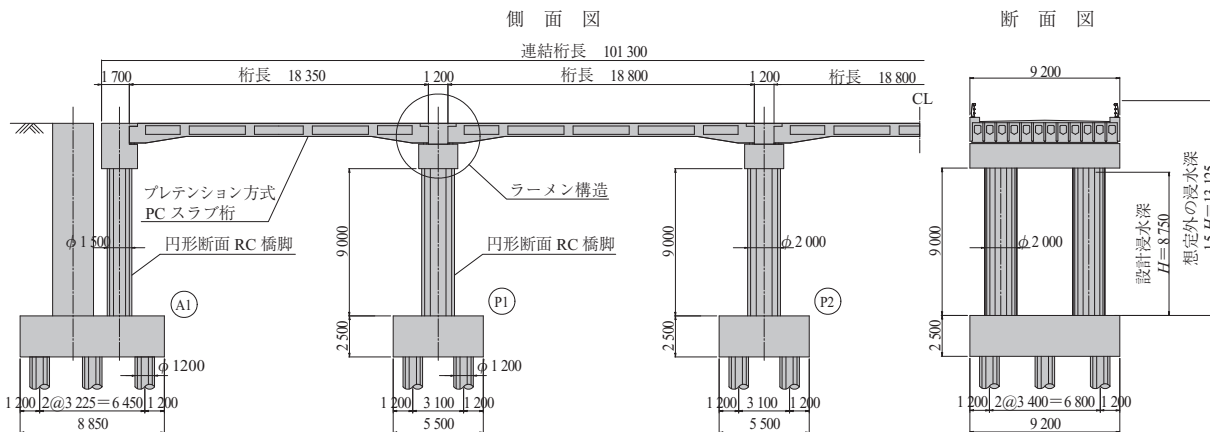


図-1 構造概要図

表-1 各部材の構造形式と期待される効果

各部材	構造形式	期待される効果
上部構造	PCスラブ桁	・閉断面であるため損傷事例の多いT桁断面 <sup>3)</sup> よりも津波抵抗性が向上する
橋脚	円柱橋脚	・円形断面とすることで任意方向の津波に対して水の抵抗を低減できる
支承部	ラーメン構造	・上揚力や浮力に対して弱点となりやすい支承部材をなくすることができる

(2) 抗力式 ①

本式は津波の水平波圧を津波の流速から算定する算定式であり、文献<sup>5)</sup>を参考とした。

$$p_H = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 \quad (2)$$

ここに、津波の水平波圧  $p_H$  (kN/m<sup>2</sup>)、水の密度  $\rho_w$  (t/m<sup>3</sup>)、抗力係数  $C_d$ 、水の流速  $v$  (m/s) を示す。なお、文献<sup>9)</sup>、<sup>10)</sup>より津波の平均流速が 6 m/s 程度、最大で 10 m/s であったため、水平荷重の算定に用いた流速は、6 m/s と 10 m/s の 2 ケースとした。

(3) 抗力式 ②

本式は津波の水平荷重を津波の流速から算定する算定式であり、文献<sup>8)</sup>を参考とした。

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{\max} \quad (3)$$

$$(hu^2)_{\max} = gR^2 \left[ 0.125 - 0.235 \frac{z}{R} + 0.11 \left( \frac{z}{R} \right)^2 \right] \quad (4)$$

ここに、水平荷重  $F_d$  (kN)、水の密度  $\rho_s$  (t/m<sup>3</sup>)、抗力係数  $C_d$ 、流れが当たる部分の構造物の幅  $B$  (m)、流れの高さ  $h$  (m)、水の速度  $u$  (m/s)、重力加速度  $g$  (m/s<sup>2</sup>)、津波の遡上高さ  $R$  (m)、構造物の海拔  $z$  (m)、 $(hu^2)$  は流速運動量を示す。なお、津波の遡上高さ  $R$  は、文献<sup>8)</sup>より津波の浸水深の 1.3 倍とし、海拔  $z$  は 1.0 m とした。

3.2.2 上揚力、浮力

津波による上揚力は文献<sup>9)</sup>の次式より算出する。

$$PQ = 0.4 \rho_w g (aH - Zl) \quad (5)$$

ここに、底面に作用する単位面積あたりの上揚力  $PQ$  (kN/m<sup>2</sup>)、水の密度  $\rho_w$  (t/m<sup>3</sup>)、重力加速度  $g$  (m/s<sup>2</sup>)、波高  $aH$  (m)、桁下高  $Zl$  (m) を示す。浮力は文献<sup>9)</sup>より上部構造が完全に水没した状態において考慮する。

$$U = \rho_w Vg \quad (6)$$

ここに、浮力  $U$  (kN)、水の密度  $\rho_w$  (t/m<sup>3</sup>)、上部工体積  $V$  (m<sup>3</sup>)、重力加速度  $g$  (m/s<sup>2</sup>) を示す。本検討では、津波による上揚力と浮力は同時に作用しないと考え、大きい方の力を考慮した。

3.2.3 漂流物の影響

漂流物の衝突荷重は文献<sup>6)</sup>において明確な算出式が示されていないことから、本検討では、文献<sup>7)</sup>の衝突荷重に準拠して次式より算出した。

$$P = 0.1 Wv \quad (7)$$

ここに、漂流物の衝突荷重  $P$  (kN)、漂流物の重量  $W$  (200 kN)、水の流速  $v$  (m/s) を示す。

3.3 荷重の組合せ

津波襲来時の荷重の組合せは表 - 2 に示すとおりである。

4. 構造解析

4.1 構造解析方法

構造解析は、上部構造・橋脚と基礎を分離したモデルとした。図 - 2 に上部構造・橋脚の解析用モデル図を示す。

上部構造・橋脚の構造解析は、上部構造を線形部材、橋

表 - 2 津波襲来時における荷重組合せ

	設計浸水深時		想定外浸水深時	
	上部構造	下部構造	上部構造	下部構造
死荷重	○	○	○	○
津波荷重	-	○	○	○
上揚力・浮力	-	-	○	-
漂流物	-	○	○	-

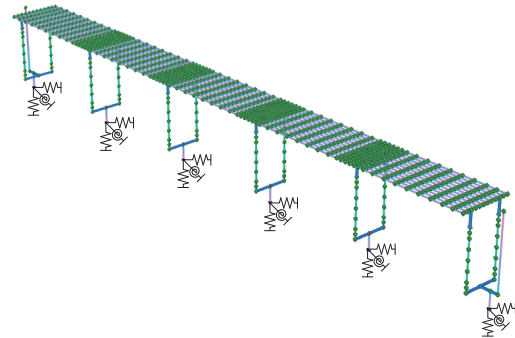


図 - 2 上部構造・橋脚の解析用モデル図

脚を非線形部材、基礎をバネ支点とした立体骨組解析モデルとし、解析方法は津波荷重を静的荷重とするプッシュオーバー解析とした。津波荷重の載荷方向は橋軸直角方向とした。なお、バネ値は基礎の構造解析から算出した。

基礎の構造解析は、杭頭がフーチングに剛結されたラーメン構造としたモデルとし、荷重は上部構造・橋脚の支点部に作用する断面力を用いた。

4.2 桁端部の構造検討

本検討では、津波に対して弱点となりやすい支承部をなくするため中間支点部にラーメン構造を採用した。一方、端支点部についても同様に津波に対して落橋を防止する構造を付与する必要がある。このため、表 - 3 に示す各構造に対して津波荷重を載荷して津波襲来時の橋梁の全体挙動を比較検討した。その検討結果として変形図を図 - 3 に示す。検討の結果、CASE 1 は津波に対しての落橋防止効果は期待できるものの上部構造に面外断面力が卓越する結果となった。CASE 2 は上部構造の作用断面力は比較的小さいが、側径間部においては支承支持構造のため、上部構造浸水時での浮力や上揚力に対する抵抗性能は低い。一方、CASE 3 は中間支点と端支点の橋脚の剛性バランスを調整することで、津波襲来時の上部構造の変形を抑制し、面外断面力の発生を低減することができた。以上より、本検討では端支点部においてもラーメン構造とする CASE 3 を採用した。

表 - 3 端支点部の支持構造の比較検討ケース

	CASE1	CASE2	CASE3
支持構造	支承支持	支承支持	ラーメン構造
直角方向拘束	拘束	自由	-

4.3 津波襲来時の各部材の要求性能

本検討では、津波作用時の要求性能、照査方法が明確に

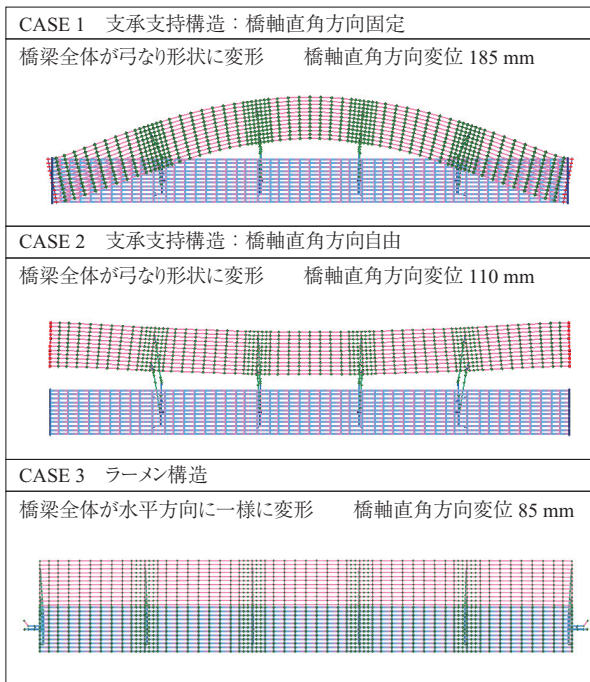


図 - 3 想定外浸水深時における各構造の平面変形図

なっていないことから、各構造の損傷状況の確認を行った。

#### 4.3.1 上部構造の照査

設計浸水深時は、ひび割れ発生限界以下の応力状態であった。また、想定外浸水深では、上下部結合部近傍において  $5 \text{ N/mm}^2$  程度の引張応力が生じる程度の損傷にとどまった。

#### 4.3.2 橋脚・基礎構造の照査

図 - 4, 5 に橋脚の  $M-N$  相関図を示す。想定外浸水深時の曲げモーメントは、軸力の変動があり一概に比較できないが、設計浸水深時に比べ 10 倍程度であった。橋脚の想定される損傷は、設計浸水深時ではひび割れが発生する

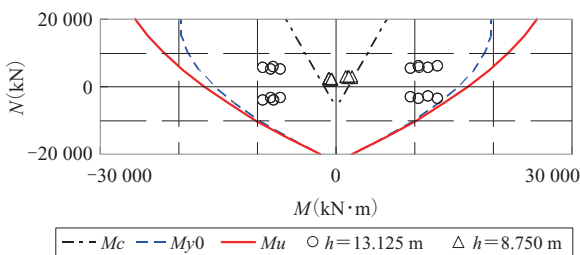


図 - 4 中間橋脚の  $M-N$  相関図

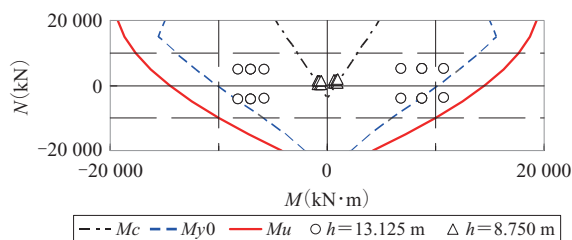


図 - 5 桁端部橋脚の  $M-N$  相関図

程度、想定外浸水深時でも、初降伏（最外縁の鉄筋が降伏）程度の損傷であった。

本検討に用いた基礎は、フーチングの幅が上部構造の幅員内に収まり、かつ杭配置が文献<sup>7)</sup>に記載されている最小間隔および縁端距離を確保できる形状とした。

上部構造・橋脚モデルの解析結果より、基礎の構造解析に用いた荷重は、想定外浸水深時には、設計浸水深時と比べ、水平荷重が 4.5 倍、曲げモーメントが 7.5 倍であった。解析結果よりすべての杭において杭体が初降伏以下であり、かつ一列の杭頭反力が文献<sup>7)</sup>を参考にした押込み支持力の上限に達しなかったことから、基礎は降伏せずに弾性域範囲内であることが確認できた。

## 5. おわりに

本報告で提案した構造は、津波に対して弱点と考えられる支承部を排除してラーメン構造とすることや津波抵抗性の高い断面形状を採用することで、橋梁全体で津波に抵抗する構造とした。

本検討は、既往の津波荷重算定式を応用した本報告独自の検討手法ではあるが、本構造は設計浸水深の津波に対して上部構造・橋脚・基礎ともに健全性を維持できたこと、さらに、想定外の津波に対しても橋脚が初降伏を超える程度の損傷であった。このことから本検討により、橋梁全体で津波に抵抗し、落橋を防止する構造が適用できる可能性を確認できた。

今後、津波に配慮した橋梁計画を行ううえで、津波荷重の評価式、津波作用時における橋梁の要求性能およびその照査方法が整備されることが望まれる。

## 参考文献

- 1) 気象庁：現地調査による津波観測点付近の津波高さについて、2011.4.
- 2) 中野、幸左、佐々木、付李：映像解析による歌津大橋の流出メカニズムの推定、第 15 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.17-24、2012.7
- 3) (社)プレストレストコンクリート技術協会：東日本大震災と PC 構造物、2012.2
- 4) 張、中尾、星限、津波の影響を受ける橋の挙動に及ぼす上部構造の構造特性の影響に関する水路実験、第 15 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.97-102、2012.7
- 5) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻）、p.268、2007.7
- 6) 国土交通省：東日本大震災における津波による建築物被害をふまえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針、2011.11
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、2002.3.
- 8) Federal Emergency Management Agency of the United States (FEMA) : Guidelines for Design of Structural Design Criteria, 2008.6.
- 9) Li Fu, Kenji Kosa, Hideki Shimizu, Zhongqi Shi : Damage Judgment of Utatsu Bridge Affected by Tsunami due to Great East Japan Earthquake, 土木学会構造工学論文集, pp.377-386, 2012.3
- 10) (独)建築研究所、東京大学生産技術研究所：2011 年度建築基準整備促進事業 40 番「津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書その 2、2011.10

【2012 年 10 月 31 日受付】