偶発作用を考慮した港湾施設の設計体系に関する検討

山本 修司*・宮原 慶**・宮田 正史***・佐貫 哲朗****・長野 卓*****

* (一財) 沿岸技術研究センター 業務執行理事

** 復建調査設計(株) 防災部 防災技術課係長

*** 国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室長

**** 復建調査設計(株) 東京支社 第一技術部 河川港湾技術課 主任エンジニア

***** (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震に伴い発生した津波は、港湾施設に甚大な被害をもたらした。このことから、想定外の偶発作用に対して港湾施設の機能が可能な限り損なわれないような設計体系が求められている。

本検討は、港湾施設を対象として、津波などの偶発作用を考慮した設計体系を構築するための基礎資料を得ることを目的として、偶発作用の設定および偶発作用を考慮した設計体系に関する検討を行ったものである。

キーワード：偶発作用、港湾施設、設計体系、津波、地震

1. はじめに

これまで、港湾施設は部分係数法により設計されているが、通常の防波堤および係船岸で照査が行われる設計状態は永続状態および変動状態（防波堤においては波浪、係船岸においてはレベル1地震動）であり、耐震強化施設のレベル2地震動に対する変形照査を除いて偶発状態の照査は通常行われていない。

このような港湾施設の設計体系において、2011年に東北地方太平洋沖を震源とした巨大地震が発生した。この地震に伴い、東北から関東にかけての東日本一帯に液状化等による沈下、沿岸域の浸水、建造物の倒壊など甚大な被害が発生した。特に、地震により発生した津波は、防波堤や防潮堤といった港湾施設の設計外力を大きく上回っており、これらの被災により背後地に更なる被害を与えることとなった。

以上のことから、多くの港湾施設が被災したことを契機とし、想定外の偶発作用への対応が求められている。

本稿では、偶発作用を考慮した設計体系を構築するに当たって、偶発作用の設定および偶発作用を考慮した設計体系に関する検討について述べる。

2. 偶発作用の設定に関する検討

2.1 対象とする偶発作用

港湾施設で考慮すべき偶発作用としては、表-1に示す6項目が考えられる。これらの作用を偶発作用として選定した理由を以下に述べる。

表-1 偶発作用の調査項目

偶発作用	
(1) 津波	(2) 地震
(3) 偶発波浪	(4) 高潮
(5) 船舶の衝突	(6) 火災

(1) 津波

①発生頻度の高い津波

発生頻度の高い津波は、対象施設を設置する地点に到達する津波のうち、「最大クラスの津波」と比較して発生頻度が高く、かつ、人命・財産または社会経済活動に重大な影響を及ぼすおそれのある規模の津波であり、津波が港湾へ浸入するのを防ぐための津波防波堤等の建設を行う上で設計外力として考慮する必要がある。したがって、発生頻度の高い津波を偶発作用として選定した。

②最大クラスの津波

最大クラスの津波は、対象施設を設置する地点に到達すると想定される津波のうち、発生頻度は極めて低いものの、人命・財産または社会経済活動に極めて重大な影響を及ぼす規模の津波であり、発生すれば甚大な被害を発生させるため、発電所等の重要度が著しく高い施設を守る場合や、人・財産・産業等の極度に集積している地域を守る場合など、重要度に応じて設計外力として適切に設定する必要がある。したがって、最大クラスの津波を偶発作用として選定した。

(2) 地震

①レベル2地震動

レベル2地震動は、レベル1地震動と比べ発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動であり、発生頻度が低いプレート境界型（海溝型）の大規模な地震動

と発生頻度が極めて低い内陸直下型の地震動がある。レベル2地震動は、港湾施設等に甚大な被害を発生させる上、津波の発生があれば上記のような被害も想定される。したがって、レベル2地震動を偶発作用として選定した。

(3) 偶発波浪

①波高が100年確率波高を超えるもの

近年、台風や低気圧に伴う高波による護岸崩壊や海岸堤防の破壊が頻発するようになり、その原因の一つは、波高が100年確率波高を超えるものが挙げられる。したがって、この現象を偶発波浪として選定した。

②周期が設計波の周期を超えるもの

設計波より波高は小さいものの、周期が異常に長い波浪を「長周期うねり」と呼び、一般にこのような波浪は、風波に比べてより水深の深い沖合から海底地形の影響を受けて屈折や浅水変形を生じ、浅瀬や海岸などの浅海域では大きな波高となって防波堤や護岸に作用し、大きな外力を発生させるおそれがある。したがって、この現象を偶発波浪として選定した。

③高波の継続時間が長いもの

高波の継続時間が長いほど、また、波高が大きいほどベンジャミン・フェア指数 (BFI) が大きい、即ち波高が大きいほど、最高波高/有義波高 (波高比) が大きくなり、異常波浪 (freak wave) が発生し易くなる。したがって、この現象を偶発波浪として選定した。

(4) 高潮

①地球温暖化に伴う海面上昇、台風強大化による高潮

地球温暖化が進行することにより、海面水位の上昇、異常気象の増加、台風の強大化等により高潮のリスクが増大する。これに伴い、港湾施設 (護岸・岸壁等) に与える大きな外力が発生し、さらに越流、越波によりその背後地に甚大な被害を発生させるおそれがある。したがって、この現象を偶発作用として選定した。

(5) 船舶等の衝突

①漂流等による船舶の衝突

津波氾濫流に伴って、漂流船舶等が航路を逸脱して

橋脚や岸壁等に衝突することが考えられ、船舶等の衝突力が外力として構造物に作用し被害を拡大させる。したがって、この現象を偶発作用として選定した。

(6) 火災

①車両等による火災

火災には一般の建築物を対象とした「通常の火災」と車両火災を想定した「特殊な火災」があり、特殊な火災には駐車場の火災と、トンネル空間の火災がある。特に、トンネル空間の火災はトンネル構造そのものへの影響が想定され、さらに二次災害も考えられる。したがって、この現象を偶発作用として選定した。

②地震・津波による火災

地震により倒壊した家屋内外のライフラインの破壊等から出火する従来型火災と、津波により流された家屋の瓦礫から何らかの原因 (石油の漏洩、LPGの漏洩、酸化された鉄くず等) で着火する津波型火災がある。両者とも偶発作用である地震および津波により甚大な被害を発生させる恐れがある。したがって、この現象を偶発作用として選定した。

2.2 港湾施設に対する偶発作用を考慮した

設計体系の検討

表-2に示す港湾施設を対象として、各施設の構造計画・構造設計を行う際の要求性能、性能規定、性能照査手法および照査基準値の設定の案を表-3~表-7に示す。これらは著者らの試案であり、今後の議論を経て変更されるべきものである。

表-2 偶発作用を考慮する港湾施設

港湾施設	構造物等
①水域施設	航路、泊地
②外郭施設	防波堤、防潮堤、水門、閘門、護岸
③係留施設	係船岸、棧橋
④荷さばき施設	軌道走行式荷役機械
⑤その他	廃棄物埋立護岸

表-3 港湾施設に対する偶発作用を考慮した設計体系 (①水域施設)

偶発作用		①水域施設：航路、泊地			
		要求性能 (案)	性能規定 (案)	性能照査手法 (案)	照査規準値の設定例 (案)
(1) 津波	発生頻度の高い津波	・耐震強化施設と密接な関係にある航路、泊地は耐震強化施設に応じて使用性または修復性確保。 ・その他航路、泊地：-	・耐震強化施設と密接な関係にある航路、泊地は航路、泊地の機能が健全な状態であることを照査。 ・その他航路、泊地：-	・底質移動シミュレーション ・その他航路、泊地：-	・所要の水深や幅等の確保の確認。 ・その他航路、泊地：-
	最大津波クラス	・耐震強化施設と密接な関係にある航路、泊地は安全性確保。 ・その他航路、泊地：-	・耐震強化施設と密接な関係にある航路、泊地は洗掘・堆積が限界値以下 ・その他航路、泊地：-	・底質移動シミュレーション ・その他航路、泊地：-	・航行できる最低限の水深や幅等の確保の確認。 ・その他航路、泊地：-
(2) 地震		・耐震強化施設と密接な関係にある航路、泊地は使用性または修復性確保。 ・その他航路、泊地：-	・耐震強化施設と密接な関係にある航路、泊地はレベル2地震動による航路法面等の変形に対する使用性または修復性の照査。 ・その他航路、泊地：-	・地震応答解析 ・その他航路、泊地：-	・所要の水深や幅等の確保の確認。 ・その他航路、泊地：-
		・耐震強化施設と密接な関係にある航路、泊地は使用性確保。 ・その他航路、泊地：-	・耐震強化施設と密接な関係にある航路、泊地は波浪の規模に応じた破壊形態を検討し機能上の使用性確保が可能であることを照査。 ・その他航路、泊地：-	・波浪変形計算 ・底質移動シミュレーション ・その他航路、泊地：-	・所要の水深や幅等の確保の確認。 ・その他航路、泊地：-
(3) 偶発波浪		-	-	-	-
(4) 高潮		-	-	-	-
(5) 船舶の衝突		-	-	-	-
(6) 火災		-	-	-	-

表-4 港湾施設に対する偶発作用を考慮した設計体系 (②外郭施設)

偶発作用		②外郭施設：防波堤，防潮堤，水門，開門，護岸，胸壁			
		要求性能(案)	性能規定(案)	性能照査手法(案)	照査規準値の設定例(案)
(1) 津波	発生頻度の高い津波	・津波防波堤は使用性確保。 ・通常防波堤は、変形は許容するが倒壊しにくい粘り強い構造とし修復性確保。	・津波防波堤は施設の機能が健全な状態であり速やかに使用性確保が可能であることを照査。 ・通常防波堤は変形量が限界値以下であること。	・津波防波堤は安定計算及び期待滑動量の検討 ・通常防波堤は期待滑動量の検討	・津波防波堤： 1) 耐力作用比1.0以上 2) 期待滑動量が限界値以下 ・通常防波堤： 1) 期待滑動量が限界値以下
	最大の津波クラス	・津波防波堤は変形は許容するが倒壊しにくい粘り強い構造とし修復性確保。 ・通常の防波堤：－	・津波防波堤は構造の弱点部分を工夫し粘り強い構造であることを照査。 ・通常の防波堤：－	・津波防波堤は安定計算、期待滑動量及び模型実験による検討。 ・通常の防波堤：－	・津波防波堤： 1) 耐力作用比1.0以上 2) 期待滑動量が限界値以下 ・通常防波堤：－
(2) 地震		・津波防波堤は使用性または修復性確保。	・津波防波堤はレベル2地震力による変形が限定的なものであることを照査し使用性または修復性確保が可能であることを照査。	・津波防波堤は安定計算及び地震応答解析による検討。	1) 耐力作用比1.0以上 2) 期待滑動量が限界値以下
		・通常防波堤は安全性確保。	・通常防波堤はレベル2地震動による損傷が限界値以下であることを照査。	・通常防波堤は安定計算及び期待滑動量の検討。	1) 期待滑動量が限界値以下
(3) 偶発波浪		・修復性または安全性確保。	・損傷が限界値以下であることを照査	・安定計算及び期待滑動量の検討。	1) 期待滑動量が限界値以下
(4) 高潮		・高潮防波堤は使用性または修復性。	・損傷が限界値以下であることを照査。	・安定計算及び期待滑動量の検討。	1) 期待滑動量が限界値以下
		・通常防波堤は修復性	同上	同上	
(5) 船舶の衝突		・要求性能を求めない。	－	－	－
(6) 火災		・要求性能を求めない。	－	－	－

表-5 港湾施設に対する偶発作用を考慮した設計体系 (③係留施設)

偶発作用		③係留施設：係船岸			
		要求性能(案)	性能規定(案)	性能照査手法(案)	照査規準値の設定例(案)
(1) 津波	発生頻度の高い津波	・耐震強化施設は基礎の洗掘、引波、浸水の可能性も考慮し使用性確保。 ・通常施設は基礎の洗掘、引波、浸水の可能性も考慮し修復性または安全性確保。	・耐震強化施設は施設の機能が健全な状態であり速やかに使用性確保が可能であることを照査。 ・通常施設は軽妙な修復により短期間のうちに機能が回復できることを照査	・安定計算及び模型実験 ・安定計算及び模型実験	・耐力作用比1.0以上 ・通常施設：－
	最大の津波クラス	・耐震強化施設は変形は許容するが倒壊しにくい粘り強い構造とし修復性確保。 ・通常施設：－	・耐震強化施設は構造の弱点部分を工夫し粘り強い構造であることを照査。 ・通常施設：－	・安定計算及び模型実験 ・通常施設：－	・耐力作用比1.0以上 ・通常施設：－
(2) 地震		・耐震強化施設はレベル2地震動等の作用により機能が損なわれても使用性または修復性確保。	・耐震強化施設は、レベル2地震動による変形は限定的なものであることを照査し使用性確保が可能であることを照査。	・地震応答解析	・残留変形量が限界値以下。
		・通常施設：－	・通常施設：－	・通常施設：－	
(3) 偶発波浪		・耐震強化施設は使用性確保。	・耐震強化施設は、エプロンが浸水しても荷役に支障がないことを照査。	・波浪変形計算及び越波量計算	・越波流量が限界値以下
		・通常施設：－	・通常施設：－	・通常施設：－	・通常施設：－
(4) 高潮		・耐震強化施設は、使用性確保。	・耐震強化施設は、エプロンが浸水しても荷役に支障がないことを照査。	・高潮シミュレーション	・越波流量が限界値以下
		・通常施設：－	・通常施設：－	・通常施設：－	・通常施設：－
(5) 船舶の衝突		・要求性能を求めない。	－	－	－
(6) 火災		・要求性能を求めない。	－	－	－

表-6 港湾施設に対する偶発作用を考慮した設計体系 (④荷さばき施設)

偶発作用		④荷さばき施設：軌道走行式荷役機械			
		要求性能(案)	性能規定(案)	性能照査手法(案)	照査規準値の設定例(案)
(1) 津波	発生頻度の高い津波	・大規模地震対策施設として港湾計画に定められた施設は、津波による浸水に対して荷役機械の使用性確保。 ・その他施設：－	・施設の機能が健全であり速やかに使用性確保が可能であることを照査。 ・その他施設：－	・津波シミュレーション及び安定計算。 ・その他施設：－	・侵水流が限界値以下 ・その他施設：－
	最大の津波クラスの津波	・大規模地震対策施設として港湾計画に定められた施設は、津波浸水による荷役機械の修復性又は安全性確保。 ・その他施設：－	・荷役機械の損傷が限界値以下であり短期間のうちに荷役を行うことができることを照査。 ・その他施設：－	・津波シミュレーション及び安定計算。 ・その他施設：－	・侵水流が限界値以下 ・その他施設：－
(2) 地震		・耐震強化施設のランクに応じて使用性又は修復性を確保。	・耐震強化施設上の荷役機械はレベル2地震動による損傷が限界値以下であることを照査。	・地震時応答解析	・免震装置の脚の変位量が許容変位量以下 ・免震装置の脚の浮き上がりの有無
		・その他施設：－	・その他施設：－	・その他施設：－	・その他施設：－
(3) 偶発波浪		・耐震強化施設上の荷役機械は使用性確保。	・耐震強化施設上の荷役機械はエプロンが浸水しても荷役に支障がないことを照査。	・波浪変形計算及び越波量計算	・越波流量が限界値以下
		・その他施設：－	・その他施設：－	・その他施設：－	・その他施設：－
(4) 高潮		・耐震強化施設上の荷役機械は、使用性確保。	・耐震強化施設上の荷役機械はエプロンが浸水しても荷役に支障がないことを照査。	・高潮シミュレーション	・越波流量が限界値以下
		・その他施設：－	・その他施設：－	・その他施設：－	・その他施設：－
(5) 船舶の衝突		・要求性能を求めない。	－	－	－
(6) 火災		・要求性能を求めない。	－	－	－

表-7 港湾施設に対する偶発作用を考慮した設計体系 (⑤その他)

偶発作用		⑤その他：廃棄物埋立護岸			
		要求性能(案)	性能規定(案)	性能照査手法(案)	照査規準値の設定例(案)
(1) 津波	の発生頻度の高い津波	・津波による浸水に対して埋立地内の廃棄物等が場外に流出しないように使用性または修復性確保.	・施設の機能が健全な状態であり速やかに使用性確保が可能であることを照査.	・安定計算及び模型実験	・耐力作用比1.0以上
	最大クラスの津波	・津波による浸水に対して埋立地内の廃棄物等が場外に流出することを抑えるため、変形は許容するが倒壊しにくい粘り強い構造とし修復性または安全性確保.	・津波が作用しても機能が損なわれないよう構造の弱点部分を工夫し粘り強い構造であることを照査.	・安定計算及び模型実験	・残留変形量が限界値以下
(2) 地震		・レベル2地震動の作用による損傷等で機能が損なわれた場合でも使用性または修復性確保.	・レベル2地震動による変形は限定的なものであることを照査し使用性または修復性の確保が可能であることを照査.	・地震応答解析	・残留変形量が限界値以下 ・遮水構造の変形量が限界値以下
(3) 偶発波浪		・使用性または修復性確保	・波浪による越波等に対して廃棄物や保有水が流出しないことを照査.	・波浪変形計算及び越波流量の検討	・越波流量が限界値以下
(4) 高潮		・使用性または修復性確保	・高潮による越波等に対して廃棄物や保有水が流出しないことを照査.	・波浪変形計算及び越波流量の検討	・越波流量が限界値以下
(5) 船舶の衝突		・要求性能を求めない.	—	—	—
(6) 火災		・要求性能を求めない.	—	—	—

3. おわりに

今回の検討では港湾施設を対象として、津波などの偶発作用を考慮した設計体系を構築するための基礎検討として、偶発作用の設定および偶発作用を考慮した設計体系に関する検討を行った。

今後、偶発作用の導入が港湾施設の安定性におよぼす影響を具体的に評価し、偶発作用に関する設計体系を確立する必要がある。

謝辞

本稿は、国土交通省国土技術政策総合研究所発注の偶発作用を考慮した港湾施設の設計体系に関する検討調査業務の成果の一部をまとめたものである。

検討調査に当たっては、国土技術政策総合研究所港湾施設研究室の関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）津波断層モデル編－津波断層モデルと津波高・浸水域等について－, pp. 1-100, 2012.
- 2) 中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告, pp. 1-44, 2011.
- 3) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン, pp. 1-35, 2012.
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 上巻, pp. 120-411, 2007.
- 5) 水産庁：平成23年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方－防波堤・岸壁における耐震・耐津波強化対策方針(案)－, pp. 1-36, 2012.
- 6) Tso-Ren Wu : Lessons Learned from the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami Event, 2011
- 7) Shigeru KATO, Junaidi, Takumi OKABE, Shinich AOKI, Syamsidik : Study on Tsunami Disaster Reduction by Coastal Topography, 2011.

- 8) 中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）強震断層モデル編－強震断層モデルと震度分布について－, pp. 1-45, 2012.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, pp. 9-117, 2012.
- 10) 国土交通省国土技術政策総合研究所：耐震強化施設としてのコンテナクレーンの耐震性能照査手法に関する研究(その1, 2, 3), pp. 1-50, 2008-2010.
- 11) Eurocode8 : Design of structures for earthquake resistance - Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings, pp. 1-77, 1998-2004.
- 12) 平石哲也, 平山克也, 加島寛章, 春尾和人, 宮里一郎：偶発波浪荷重による被害例とその特性, 海洋工学論文集第55巻, 2008.
- 13) 仲井圭二, 橋本典明, 鈴山勝之：北西太平洋における異常波浪出現の時空間特性, 海洋工学論文集第53巻, 2006.
- 14) DET NORSKE VERITAS : ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL LOADS, pp. 24-43, 2007.
- 15) 港湾空港技術研究所：性能設計の高潮対策施設への適用に関する基本的な考え方, pp. 1-27, 2003.
- 16) 国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所：平成21年度伊勢湾沿岸域温暖化影響検討業務・報告書, pp. 1-51, 2010.
- 17) 国土交通省中部地方整備局四日市港湾事務所：平成21年度津松坂海岸保全施設長寿命化計画策定業務・報告書, pp. 1-170, 2011.
- 18) Ministry of Infrastructure and the Environment : Delta Programme in the Netherlands, pp. 1-15, 2011
- 19) 橋本貴之, 越村俊一, 小林英一：津波による船舶の漂流挙動解析－インドネシア・バンダアチエにおける事例－, 土木学会論文集B2(海岸工学), 2009.
- 20) Eurocode1: Actions on structures - Part 1-7 : General actions - Accidental actions, pp. 1-65, 1991-2006.
- 21) AASHTO : LRFD Bridge Design Specifications, pp. 105-124, 2007.
- 22) 関沢愛：東日本大震災における地震火災の全体様相と注目すべき特徴, 安全工学シンポジウム講演予稿集, pp. 1-9, 2011.
- 23) 福地合一：BART 海底部の火災, pp. 33-38, 1980.