

直立浮上式防波堤の浮上制御システムに関する確率論的安全評価

Probabilistic Safety Assessment of the Controlling System for Buoyancy-Driven Vertical Piling Breakwater

杉田博章¹・黒川文宏²・平澤充成³・須野原 豊⁴・由木 誠⁵・村井伸康⁶

Hiroaki SUGITA, Fumihiko KUROKAWA, Mitsunari HIRASAWA
Yutaka SUNOHARA, Makoto YUUKI and Nobuyasu MURAI

Buoyancy-driven vertical piling breakwater is planned to be installed in Wakayama-Shimotsu port to protect the rear area against the inundation caused by tsunami. The breakwater consists of upper and lower steel pipes. It will rise above the sea level by feeding air into the upper pipe when the tsunami occurs. Reliability of the controlling system, which feed air to the upper pipe, is the most important issue for this breakwater. Probabilistic safety assessment is an effective method to evaluate the reliability of systems composed of many types of equipment. This paper presents the effectiveness of the probabilistic safety assessment of the controlling system, and evaluates problems of the system, and suggests solutions to the problems.

1. はじめに

歴史的に幾度となく大津波を経験してきた我が国においては、津波による被害から背後地域を防護するために、防波堤・堤防・護岸・水門等の海岸保全施設の整備が進められてきている。しかし、港湾においては、港口部が船舶の航路として利用されていることから、通常の津波防波堤等により港口部を遮蔽することは困難である。このため、ひとたび津波が発生すると、津波が港口部から港内に侵入し、港湾の背後地に大きな被害をもたらす場合が想定されている。これらの問題を解決するため、常時は航路水深を確保し、津波来襲時には津波を防護できる、可動式の津波防波堤を港口部に設置することが検討されている。そのようななか、東南海・南海地震とその地震に伴う津波により、大きな被害が発生することが想定されている和歌山下津港の海南地区において、可動式の津波防波堤のひとつである直立浮上式防波堤の設置について検討しているところである。

直立浮上式防波堤は、図-1に示すように上部鋼管と下部鋼管から構成される鞘管を連続させて並べる形式の防波堤である(山根ら, 2005)。常時は海底に設置された下部鋼管内に上部鋼管が格納され、津波来襲時は上部鋼管内に空気を送り、浮力により浮上させて港口部を閉鎖する構造である。

直立浮上式防波堤は、地震発生後から津波が到達する

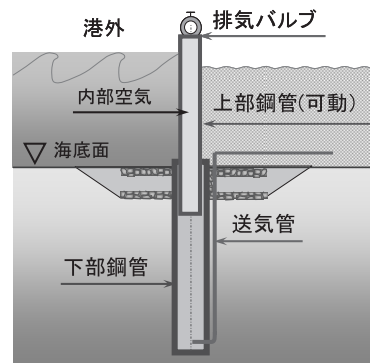


図-1 直立浮上式防波堤の構造

までの間に確実に浮上を完了させる必要があるため、浮上を制御するシステムの信頼性を高めることが極めて重要である。そこで本稿では、直立浮上式防波堤の浮上制御システムの信頼性評価における確率論的安全評価手法の有効性を検証したうえで、同手法によりシステムの設計上の課題を抽出する。

2. 確率論的安全評価

(1) 確率論的安全評価

確率論的安全評価は、システムに組み込まれている機器等の異常・故障・破損等を確率的な事象としてとらえ、事故や失敗等が発生する確率(リスク)を定量的に評価する手法である。米国の原子炉施設の安全管理を目的に開発が進められた手法であり、大規模プラント等の安全評価に導入されてきているが、水門・陸閘等のシステム設計に導入されている事例はほとんど見られない。

確率論的安全評価は、理論的に考えうるすべての事故

1 正会員	工修	国土交通省神戸港湾空港技術調査事務所
2		国土交通省神戸港湾空港技術調査事務所
3 正会員	工博	国土交通省神戸港湾空港技術調査事務所
4 正会員		前国土交通省港湾局
5		(財)沿岸技術研究センター
6 正会員	工修	(財)沿岸技術研究センター

シナリオを対象とし、異常・故障・破損等の起因事象の発生確率、発生した事象の拡大を防止し影響を緩和する安全機能の喪失確率及び事象の進展・影響を定量的に分析・評価し、事故シナリオの発生確率や影響の大きさ等をもとにシステムの総合的な安全性を評価するものである。特に、発生確率は極めて小さいが、事象の進展が広範・多岐にわたるような事象の発生防止や影響緩和の諸対策の効果を総合的に評価するうえで有効な手法である。

(2) 確率論的安全評価の導入

一般的な高潮防護施設の場合、近年の気象予測の高度化等もあり、高潮が襲来するまでに施設を稼働させるための準備時間を確保することができる。また、施設に万一の故障等が発生した場合にも、修理等の対応を行うための相対的な時間的余裕がある。

一方、直立浮上式防波堤の場合、地震発生後から津波が到達するまでの時間が短いこともあり、準備等に確保できる時間が極めて短い。また、通常時は施設が海底下にあるため、万一の故障等が発生した場合にも、容易に修理ができない。したがって、直立浮上式防波堤の浮上制御システムの設計にあたっては、信頼性を適切に評価し、できる限り信頼性の高いシステムを構築する必要がある。

そこで、検討中の直立浮上式防波堤の浮上制御システムを対象に確率論的安全評価としてイベントツリー分析及びフォールトツリー分析を行い、システムの信頼性を評価し、弱点の明確化、技術的課題の抽出等を行う。

3. 直立浮上式防波堤の浮上制御システムの概要

検討中の直立浮上式防波堤の浮上制御フロー及びシステムの概要を図-2に示す。

津波警報が発令された場合、はじめに、航路上に防波堤の浮上の支障となるような船舶の航行等がないことを確認することとなる。その確認後、あらかじめ蓄圧タンクに蓄えられている空気を、送気管を通じて上部鋼管内の浮上空気室に送気することにより、防波堤を浮上させることとなる。その際、機器の故障や送気管の破断等により、防波堤の浮上が確認できなかった場合には、バックアップシステムにより浮上させることとなる。

バックアップシステムとしては、予備の蓄圧タンクを用いて空気を送気し、防波堤を浮上させることが検討されている。この場合、送気管等は通常時のシステム（以下、主システムと称す）と共有される。また、さらなるバックアップシステムとして、上部鋼管内の浮力タンク内に蓄えられている圧縮空気の圧力を解放し、空気を浮上空気室に移送することにより浮力を確保し、防波堤を浮上させることが検討されている。

以上のように、主システムとバックアップシステムにより、システムの信頼性を確保することとしている。

4. イベントツリー分析 (Event Tree Analysis)

(1) イベントツリー分析

イベントツリー分析は、事故につながるような機器の

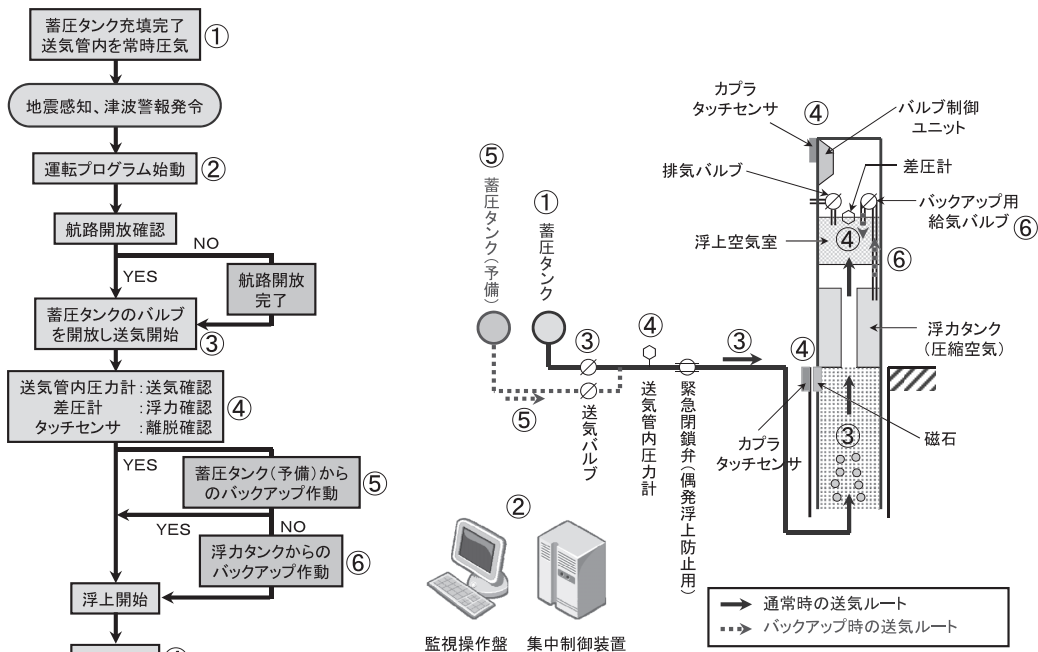


図-2 直立浮上式防波堤の浮上制御フローおよびシステムの概要

故障や操作等の成否の組み合わせを調べ上げる手法である。どのようにして事故が発生するかという道筋を求めるとともに、それぞれの事象の成否の確率から、事故の発生確率を求めることができる。

本分析を行うにあたり、システムの相対的な弱点を抽出するため、各事象の信頼度（故障等が発生しない確率）を設定する必要がある。この設定には、実際に使用される機器の選定及び故障確率の算定が必要となるが、詳細な設計が必要となることや各機器の故障確率に関するデータの蓄積が必要となることから、本稿では信頼度を表-1のとおりに設定した。信頼度は、桐本ら（2001）が算出している原子力発電所の確率論的安全評価用の信頼度を参考に各項目の相対的評価を加味して設定した。なお、桐本らに比較してかなり小さな数字を用いているが、これは、システムの信頼性を過大評価しないためである。

(2) 浮上失敗のイベントツリー

施設や機器等については、津波を発生させる東南海・南海地震よりも大きな地震力を有する直下型地震に対して、耐震設計を行うため、本研究ではイベントツリーにおいて地震発生による施設や機器等の損傷は考慮していない。

表-1 イベントツリー分析に用いる信頼度

項目	信頼度
通常の単位設備（機器） （CPU、モータ、プログラム等）	0.9999
信頼度の低い単位設備（機器） （無停電電源、無接点信号システム等）	0.999
人が介在する単位設備	0.99
人が行う作業	0.9

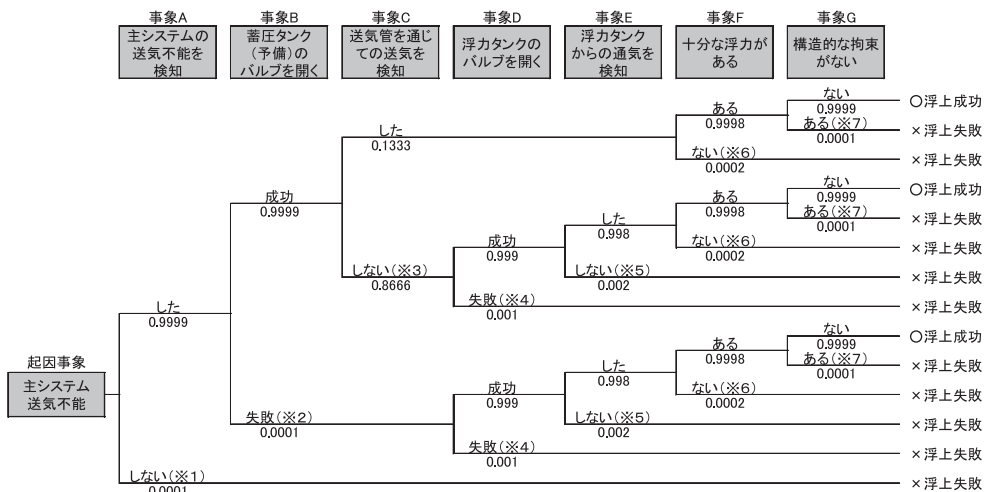
直立浮上式防波堤の浮上制御システムについて、何らかの原因により主システムによる空気の送気が不可能となり、最終的に浮上失敗に至るシナリオのイベントツリーを図-3に示す。イベントツリーは、発端となる起因事象（不具合）を左端に置き、順次対策を表す見出しを上部に示している。対策の成否により分岐し、最終的に失敗あるいは成功に至る道筋を示すツリー構造となっている。また図-3に示す数字は、表-1に示した信頼度を用いて算出されたそれぞれの事象の発生確率である。

図-3において、事象Cの失敗する確率が非常に高くなっている。これは、蓄圧タンク（予備）が主システムの蓄圧タンクと送気管及び電動弁を共有していることから、主システムによる送気が不可能となった原因が送気管の破断や電動弁の故障によるものであった場合に、蓄圧タンク（予備）による送気も同じ原因により不可能となるためである。なお、事象Cの失敗する確率は、5.のフォールトツリー分析を実施することにより算出することができ、主システムの故障確率に対する送気管または電動弁の故障確率の寄与率により求められる。

したがって、図-3のイベントツリーによる分析を行うと、事象Cの介在により送気管及び電動弁の信頼性負担が相対的に重くなっており、システムの相対的な弱点として、バックアップシステムとしての蓄圧タンク（予備）の信頼性が低いという課題が抽出される。なお、信頼性を高めるための対策として、送気管及び電動弁の二重化（独立化）が考えられる。

(3) イベントツリー分析の結果

表-2に示す各失敗シナリオについて、(2)と同様にイベントツリーによる分析を行い、システムの弱点や技術



(※1) 機器等の故障により浮上失敗を検知できない場 (※2) 機器等の故障により蓄圧タンク(予備)のバルブを開けない場合
(※3) 送気管の破断等により送気できない場合 (※4) 機器等の故障により浮力タンクのバルブを開けない場合
(※5) 機器等の故障により送気できない場合 (※6) 空気漏れ等により浮力が足りない場合
(※7) 外的要因により防波堤の浮上が物理的に拘束された場合

図-3 直立浮上式防波堤の浮上失敗のイベントツリー

表-2 イベントツリー分析に用いるシナリオ一覧

シナリオ1	浮上操作を行ったが浮上しなかった
シナリオ2	浮上操作を行っていないが事故浮上した
シナリオ3	維持管理作業中に津波が来襲した
シナリオ4	一度浮上させた後の復帰作業中に津波が来襲した
シナリオ5	浮上操作中に防波堤に大型船舶が衝突した

的課題を抽出する。シナリオ1～4に共通して抽出される主な課題は以下のとおりである。

①システムプログラムの適用性

システム全体を管理するプログラムは、様々なシナリオに対応できるプログラムを構築する必要がある。

②人介在イベントの信頼性

人による操作が介在する場合、相対的な信頼性が低くなるため、人介在イベントを可能な限り少なくするとともに、管理者教育や支援システムの構築によるヒューマンエラーの低減を図る必要がある。

③バックアップシステムの信頼性

送気管及び電動弁の共有が、蓄圧タンク（予備）によるバックアップシステムの信頼性を低下させており、送気管及び電動弁の二重化（独立化）等を図る必要がある。また、浮力タンクによるバックアップシステムは、上部鋼管内の機器等が信頼性を低下させており、機器の二重化や結合方法のシンプル化等を図る必要がある。

④操作機器等の信頼性

当該システムが種々の機器を結合して構成されているため、それぞれの機器の全体の信頼性に対する負担が重くなっている。信頼性を高めるための対策として、重点的な維持管理による個々の機器の信頼度の向上や二重化、結合方法のシンプル化等が考えられる。

なお、シナリオ5のイベントツリー分析においては、システムの改良等による対応が困難であることが明らかとなり、警報装置等により大型船舶の衝突を回避するための対策を図る必要があると考えられる。

5. フォールトツリー分析 (Fault Tree Analysis)

(1) 浮上失敗のフォールトツリー

フォールトツリー分析は、システムの故障を構成機器毎の故障に分解して分析する手法である。複数の機器から構成されたシステムを構成するそれぞれの機器の故障、誤動作等を単純な論理関係で結合して表現したものであり、故障等の発生確率等を求めることができる。

直立浮上式防波堤の浮上制御システムについて、浮上失敗のフォールトツリーを図-4に示す。図中の「ORゲート」は、下位から接続している故障要因のうち一つでも発生した場合に上位の故障が発生することを示しており、「ANDゲート」は、下位の故障要因のすべてが発生した場合に上位の故障が発生することを示している。

図-4のフォールトツリーは、それぞれの構成機器の故障に分解することができる。主システム故障に至るフォールトツリーの例を図-5に示す。フォールトツリーを用

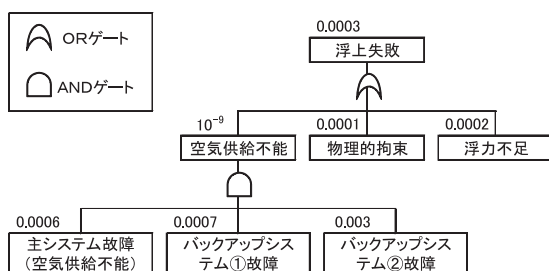


図-4 浮上失敗のフォールトツリー

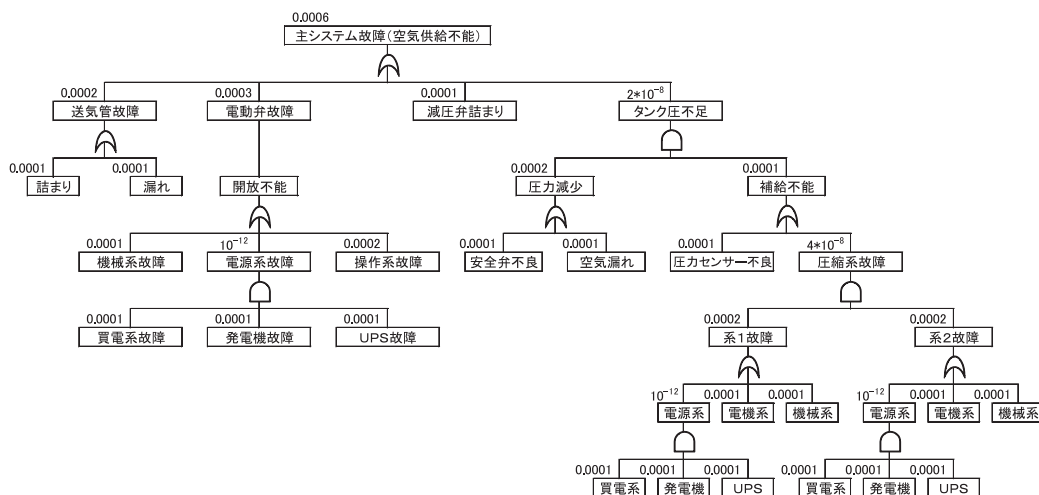


図-5 主システム故障のフォールトツリー

いと、それぞれの機器の故障確率を定めることにより、システムの故障等の発生確率を求めることが可能となる。図-4及び図-5に示す数字は、表-1に示した信頼度を用いて算出されたそれぞれの事象の発生確率である。

図-4において、浮力タンクによるバックアップ（バックアップシステム②）の故障確率が、主システムや蓄圧タンク（予備）によるバックアップ（バックアップシステム①）の故障確率と比べて、システム全体の故障確率に対する寄与率が高く、相対的に信頼性が低くなっている。これは、浮力タンクによるバックアップシステムが上部鋼管内に無停電電源（UPS）、CPU、圧力計、電動弁等の様々な精密機器を設置する必要があることや、ひとたび上部鋼管を格納すると、点検等の維持管理が通常の機器に比べると難しいという課題があるためである。

したがって、図-4のフォールトツリーによる分析を行うと、浮力タンクによるバックアップの信頼性が相対的に低いという課題が抽出され、よりシンプルなバックアップシステムを検討するなど、バックアップシステムの信頼性の向上の検討が必要であることが分かる。

(2) フォールトツリー分析の結果

表-2に示すシナリオのうち、機器の故障を要因として発生するシナリオ1及びシナリオ2についてフォールトツリーによる分析を行うと、システムの相対的な弱点や技術的課題として主に以下の点が抽出される。

①人介在イベント及び操作機器等の信頼性

イベントツリーによる分析と同様に人介在イベント及び操作機器等の信頼性の低下が課題となるため、信頼性向上のための対策の検討が必要である。

②構造設計の課題

送気のためのシステムの信頼性を向上させるとともに、構造設計の課題を解消する必要がある。現時点での構造設計では、防波堤の浮上に要する時間の短縮や空気量の縮減を図るため、あらかじめ上部鋼管に浮上しない程度の浮力を与えておくことが検討されているが、浮力確保の信頼性向上について検討を進める必要がある。

6. 分析結果のまとめ

フォールトツリーによって求められる個々の機器等の故障等の発生確率は、イベントツリーで示される最終事象の発生確率に包含される構造となっている。それぞれの分析は、対象とする事象についての切り口を変えたものであり、相互に補完する関係にある。

直立浮上式防波堤の浮上制御システムについてのイベントツリー分析及びフォールトツリー分析により、以下の点についてシステムの設計上の課題が抽出される。

(1) バックアップシステム

イベントツリーによる分析では、蓄圧タンク（予備）

によるバックアップシステムが、主システムと送気管及び電動弁を共有していることにより、信頼性が低下していることが示されている。一方で、フォールトツリーによる分析では、浮力タンクによるバックアップシステムの故障確率のシステム全体の故障確率に対する寄与率が高いことが示されている。したがって、蓄圧タンク（予備）の送気管及び電動弁を二重化（独立化）をすることによりバックアップシステムの信頼性を向上させるとともに、信頼性の低い浮力タンクによるバックアップシステムの必要性についても検討する必要がある。

(2) 人介在イベント

人による操作が介在する場合の信頼性の低下が課題となっている。システム設計にあたっては、人介在イベントを可能な限り少なくする必要がある。一方で、施設の運営や維持管理においては、管理者教育や支援システムの構築によるヒューマンエラーの低減を図る必要がある。

(3) 各種機器等の設計

システムを構成する各種機器については、故障確率や寄与率を勘案して二重化するとともに、結合方法のシンプル化等を図る必要がある。

7. おわりに

本稿では、直立浮上式防波堤の浮上制御システムの信頼性評価における確率論的安全評価手法の有効性を検証し、システムの設計上の課題を抽出した。システムの弱点の明確化や技術的課題の抽出を行うにあたり、確率論的安全評価手法が有効であることが分かった。

直立浮上式防波堤の浮上制御システムについては、バックアップシステムの構成等の課題が明らかになるとともに、今後の検討の方向性が示された。また、人介在イベントの信頼性に関する問題が明らかになった。

可動式津波防波堤のように、失敗が許されない施設の設計を行う場合、システムの弱点や設計上の課題を明確にするために、本稿で示した分析手法を活用することは極めて有効と考える。なお、本稿ではシステムの相対的な弱点を抽出する目的から、各事象の信頼度を原子力発電所のデータを参考に設定したが、システムの信頼度を絶対値として評価するためには、機器等の実際の故障確率等のデータを蓄積していくことが重要である。

参 考 文 献

- 桐本順広・松崎章弘・佐々木 亨（2001）：原子力発電所に関する確率論的安全評価用の機器故障率の算出，電力中央研究所原子力情報センター，pp.93-97.
- 山根隆行・有川太郎・伊藤政人・増山琢也・亀井幸雄・宮坂政司（2005）：直立浮上式防波堤の開発，海洋開発論文集，Vol.21，pp.115-120.