

排水計画における水理機能の信頼性設計法の概念について

丹治 肇* 桐 博英* 中矢哲郎*

*水利工学研究領域 沿岸域水理担当

キーワード：性能設計法, 信頼性設計法, S-P-R法, 水理性能, ISO2394

I 緒言

1 検討の背景と目的

設計に性能に関する確率的な概念を導入する場合には、「性能設計法」と「信頼性設計法」という用語が使われる。性能設計法, 信頼性設計法は, 構造性能の設計法の国際的に基本的な設計理念になりつつある。

性能設計という概念は, 例えば, ゲートの扉は鋼製に限らず, 十分な強度と耐久性を持つ素材であれば何を使ってもよいというように, 「仕様」でなく「性能」を規定する考え方で, 構造設計以外にも広く使える概念である。この点では, 性能設計の概念は, 水理機能にも利用可能と思われる。一方, 信頼性の概念は, 従来の安全率を確率表現することを指す。これは水理設計ではリターン・ピリオドのように従来から使われてきた概念でもある。

ここでは, この2つの概念を水理性能の規定に用いる場合の問題点と解決策を検討する。検討対象には, 排水計画をとる。排水計画とは, ある要求性能を満たす施設の管理を考えた最も経済的な施設容量と施設配置を決定する問題である。現在, 農地の排水計画を規定する基準には, **Table 1**に示す「汎用農地化のための技術指針」(農業土木学会, 1978)と「設計基準・計画・排水」(農業農村工学会, 2006)がある。前者では, 損失降雨と降雨が排水されるまでの時間遅れが考慮されていないが, 後者ではこの点が考慮されている。この点で2つの基準の間には整合性がない。特に前者は排水性能を規定していない点は現在の水準からみて問題があろう。

検討の始めに筆者らが考える「性能設計法」または「信頼性設計法」の最大公約数的な理解を示す。次の3点がこれらの設計法に必要な条件と思われる。

- 1) 合理的な評価指標として要求性能が明示されること。
- 2) 性能はできるだけ確率分布として評価され信頼性が与えられること。
- 3) 水理施設をシステムとして評価すること。

3)は構造性能では例外的な水理施設固有の特徴である。構造物が将棋倒しのように連鎖を起こして破壊する事例は, 阪神淡路震災の高速道路被災のような例外を除けば考えられない。一方, 水路のような水理施設では, 用水は上流から流れ, 排水は下流から排除されるので, 連鎖

を前提としたシステムとしての評価が必須になる。

排水計画の水理性能の検討において, 最初に断っておかなければならない点は, 排水計画の水理性能を扱った既存の文献は皆無であるという点である。このため, ここでは排水計画の水理性能の既存の文献から検討を始めることができない。このことから排水計画の水理性能を検討することは無謀と判断する立場もあるが, 「仕様」でなく「性能」という立場からは検討は可能と判断した。そこで, 初めに, 既存の構造性能から見た信頼性設計法の歴史と概念をレビューし, 水理設計に信頼性設計法の概念を適用可能か検討する。次に, 既存の文献の中で排水計画の水理設計の信頼性設計法に最も近い海岸堤防のリスク評価の事例を紹介する。最後に, この事例を参考に, 排水計画の信頼性設計法の検討を行う。排水計画の水理設計の信頼性設計法には実例が皆無なので, ここでは概念フレームワークの検討に焦点を絞った。

ここで排水計画というのは, **Fig.1**のような排水施設群を指す。排水ポンプと重なるため図示していないが, 一般に, 排水機場には, 排水樋門も設置されている。**Fig.1**は, 外水位が海の場合であるが, 外水位が河川の

Table 1 排水計画にかかわる基準
Standards related to drainage planning

出典	汎用農地化のための技術指針	設計基準・計画・排水
水田	24時間雨量24時間排除	許容湛水30cm未満24時間以内
転換畑	4時間雨量4時間排除	許容湛水5cm未満
備考	性能規定ではない	開花時期以前は不適切

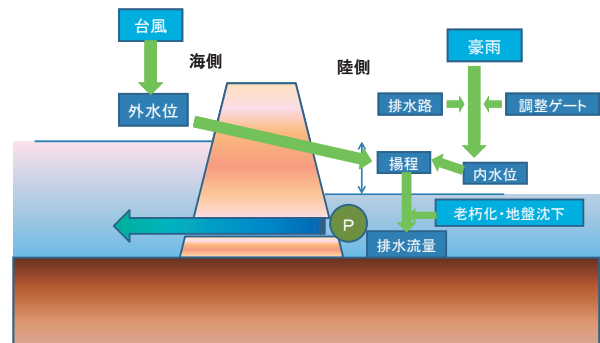


Fig.1 排水施設群の概要
Outline of drainage facilities

場合も基本的な構造は同じである。現行の排水計画基準では、降雨は確率降雨を用いているので、確率分布は考慮されていないものの、確率評価がなされている。一方、計画に用いられる外水は降雨とは対応していない。これは、外水の決定要因が潮汐、台風、洪水などであるため、降雨と対応した確率評価を行うためには、降雨と外水の同時発生確率を扱わなければならないためである。この部分は既往の研究がきわめて少なく今後の課題であるため、ここでは深入りしないことにする。

II 信頼性設計法の歴史

1 性能設計法と信頼性設計法

性能設計法と信頼性設計法は、包括設計コード(案)(土木学会, 2003)に基づく Fig.2 で説明できる。Fig.2 の目的、要求性能、性能規定は、性能記述を階層化したものである。性能照査は、具体的な設計法を記述したもので、信頼性設計法は、この性能照査手法の一部に相当する。信頼性設計法は、新しい性能照査手法の中核をなすものである。なお、信頼性設計法は、性能設計法とは独立に歴史的に技術開発が進んだ設計法で、包括設計コードに基づかない信頼性設計法も存在する。この問題は、水理機能を包括設計コードの下で評価すべきか、別の枠組みを使うべきかという基礎体系の問題で、次節以下で論ずる。

2 信頼性設計法の始まり

石川 (1982) はそれまでの信頼性設計法のレビューを行っているので、これに従い信頼性設計法の起源を見る。

石川は、信頼性設計法 (reliability-based design) または、確率論的設計法 (probability-based design) の発展過程を整理している。信頼性設計法は、Freudenthal (1947) が安全性の評価基準に破壊確率の概念を導入した古典的信頼性理論に遡る。Freudenthal は確率分布を想定した破壊確率を提案したが、想定する分布形により、結果が大きく異なり、主観的な判断の余地が大きかった。Ang と Amin (1969) は不確実性を本来の統計的な変動性に基づく客観的なものと、荷重のモデル化や構造解析上のモデル化に伴う誤差、設計・製作・施工段階に混入する

人為的誤差など、今まで設計者の主観に基づいて決定していた事項を階層化して取り扱う拡張信頼性理論を提案した。この方法では、仮定する分布形にかかわらず、ほぼ同一の結果が得られ、正規分布を仮定した解析に実用化の目途がついた。不確実性を含んだ設計変数が確率変数として複数ある場合には、確率変数の結合密度関数を多重積分する必要があるため、計算が困難になる。Rackwitz (1979) は目的関数とし構造物の限界状態を表す指標を導入し、線形化2次モーメントを用いた近似計算で限界性能Zを計算する手法を提案した。以上の要点を Table 2 に比較する。

これ以降、構造物の信頼性設計法では限界状態を中心に研究が進んだ。このころまでの信頼性設計法について体系的に取りまとめた著書には星谷ら (1986) があり、よく引用される。なお、1982年以降、統計学では、PCの普及に伴いマルコフ連鎖モンテカルロ法 (Markov chain Monte Carlo methods : MCMC)、メトロポリスヘースティング法などが開発普及し、任意の確率分布の積分が容易にできるようになった。また、事前事後確率を取り扱うベイズ統計学も広く普及している。これらの統計学の知見も、最近の信頼性設計法では、広く用いられている。

さて、信頼性設計法を水理機能に適用した場合に、Ang と Amin (1969) のように想定する確率分布の影響が解析結果に影響を与えないかが問題になろう。丹治ら (2011) はこの問題に対して、排水計画については正規分布、対数正規分布、一様分布の3種類の分布で対応可能なことを示した。対数正規分布と Weibull 分布の間に際立った差は見られなかった。そこで、対数正規分布を考えれば、分布形状による結果の違いに問題はないと考えられる。

3 信頼性設計法から性能設計法へ

このように信頼性設計法は1980年には知られていた。また、後にEU域内の建設産業の国際競争力に貢献するツールとして認識される、欧州構造基準 (ユーロコード) は1975年に開発に着手されていた。しかし、古田ら (2009) によれば、性能設計法という言葉が我が国で使われるようになったのは、クリントン政権時代の貿易交渉である日米構造協議からである。

1995年にWTOが発足した。WTOはTBT協定の第2条で「当該国際規格またはその関連部分を強制規格の基礎

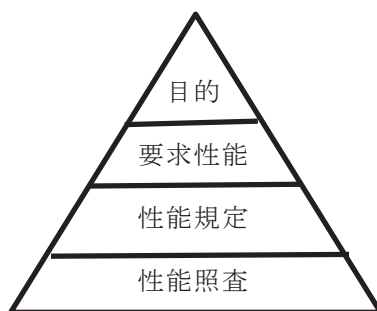


Fig.2 性能設計法の階層

Layers of performance approach of design

Table 2 信頼性設計法の発展過程
Development of reliability-based design theory

発展過程	特徴	分布形の影響	出典	年
古典的信頼性理論	破壊確率の導入	大	Freudenthal	1947
拡張信頼性理論	不確実性を客観的なものと主観的なものに分離	小	Ang&Amin	1969
AFOSM法	2次モーメント、限界状態の導入	小	Rackwitz	1979

として用いる（第4項国際標準化）」と「性能に着目した製品の要件に基づく強制規格を定める（第8項性能規定化）」を定めた。ここで初めて性能規定化に、構造以外の側面が含まれるようになった。

SEAOC (1995) (Structural Engineering Association of Southern California: 南カリフォルニア構造技術者協会) は「Vision2000: Performance based seismic engineering of buildings (建造物の性能に基づく地震工学)」を発刊した。その後、地震工学では、性能規定の流れはFEMA (Federal Emergency Management Agency of the United States: アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁) に受け継がれていく。

1997年頃ISOのTechnical Committee 98 (TC98: Basic design of structures 建造物の基本設計法) のScience Committee 3 (SC3) Loads, forces and other actions (荷重・外力とその他の作用) では、建造物の地震外力 (Seismic actions on structures) はTC98の直轄のTC98/WG1に置かれていて、地震外力は例外的な扱いであった。これはEUでは地震があまり問題にならないためである。その後、Seismic actions on structuresはTC98/SC3/WG9に位置づけられ、WG9 Seismic actions on geotechnical works (土建造物の地震配力) とWG10 Seismic actions on nonstructural components (非建造物への地震外力) が追加され、地震に対する記述が本格化した。また、SEAOC, FEMAの成果も反映されるようになった。ちなみに、隣接のTC98/SC2 (Reliability of structures: 建造物の信頼性) はISO2394 (ISO1998) を起案している。

合田 (1997) は「設計波高および設計潮位の決め方」の中で、「信頼性設計における設計波高の取扱い」を取りまとめている。設計波高は、防波堤やケーソンの滑動量にかかわるパラメータになる。ここでは性能設計法という用語は使われていない。

ISO (1998) でISO2394 (General principles on reliability for structures, 建造物の信頼性に関する一般原則) が制定された。ISO2394は建造物の信頼性に関する最上位の国際基準であり (横田, 2012), 2014年5月を目途に改訂作業が進められている。

国土交通省 (2002) は「建造物全般を対象として、構造設計に係る技術指針の策定・改訂の基本方向を示すもの」である「土木・建築にかかわる設計の基本」を公開した。この中では、「信頼性設計の考え方を基本とすることが明示され、用語の定義に「基本的要求性能」が示され、本文の最後には、「性能の検証法」が記載された。しかし、性能設計という言葉は使われていない。

土木学会 (2003) の包括設計コード策定基礎調査委員会は「包括設計コード (案) 性能設計概念に基づいた建造物設計コードのための原則・指針と用語第1版code PLATFORM Ver.1」を公開した。ここで、性能設計という言葉が初めて、明示された。したがって、性能設計法は、包括設計コードの一部をなすものと考えられる。Fig.2は包括設計コードに基づいている。

「港湾の施設の技術上の基準」の改訂に向けて、国土政策技術研究所と港湾空港技術研究所 (2005) は「性能設計と信頼性設計について (案)」を公開し、ここでは性能設計という言葉が使われている。

2007年にWTOのTBT協定を満足する初めての土木の設計基準として、レベル1性能設計法 (部分係数形式の安全性照査法) を採用した「港湾の施設の技術上の基準・同解説 (国土交通省, 2007) が制定された。この基準は、2013年1月現在、英語版とベトナム語版が出版され国際的にも影響力を持っている。

2007年にユーロコードは全編が発行された。

2008年に土木学会土木建造物荷重設計小委員会は4年間の検討を経て「性能設計における土木建造物に対する作用の指針」を発刊した。ここでは、「荷重」をより広い概念の「作用」に置き換えた。古田ら (2009) は、この指針を「あえて荷重に代わり作用という新しい概念を規定し、構造系に依存しない基本情報の提供を試みた。このような統一的な試みは、世界的にも類を見ないものである」としている。

2010年に移行期間が終了してEU域内の建造物設計基準はユーロコードに統一された。

このように、性能設計法の用語は、WTO/TBT協定に起源を持つものと、地震工学に起源を持つものがある。WTO/TBT協定では「デザインまたは記述的に示された特性よりも性能 (performance) に着目した規格」を意味する。ISOでも、地震外力に対する記述は充実したものの、性能にはWTO/TBT協定と同じperformanceの用語が当てられ、performance approachが使われ、performance-based designとは言わない (松井, 2012)。つまり、performance approach (性能規定) は仕様規定の反対語として使われている。一方、包括コード (案) で用いられている性能設計は、地震工学からきた性能概念で仕様規定を一部含む点で特殊である。また、包括コード (案) に次いで出された「性能設計における土木建造物に対する作用の指針」では構造系に依存しない作用を目指したが、これも国際的には特殊である。

Ⅲ 水理機能の信頼性設計法の検討

1 水理機能に信頼性設計法は考えられるか

地震工学に起源を持つISO系の性能規定には本来水理性能は含まれていない。しかし、水理性能を「性能設計における土木建造物に対する作用の指針」のように、構造系を拡張した形で性能規定する方向も考えられる。一方、WTO/TBT協定に示された性能規定には、水理性能が含まれている。Table 3に性能設計法の起源を整理した。WTO/TBTでは、水理性能について、仕様設計の反対語として、性能設計を挙げているが、ISOに対応するような水理性能の性能設計法を扱っている文献はない。現実には、性能設計法はほぼ構造性能にかかわる場面で

Table 3 性能設計法の起源
Roots of performance approach

種類	ISO	WTO/TBT
国内初出	2003	1995
仕様設計	含む	含まない
水理性能	含まない	含む

しか使われない。そこで、混乱を避けるために以下では、WTO/TBTの仕様性能の反対語の場合も含めて、信頼性設計法という用語で統一する。

信頼性設計法の設計思想は、パラメータの確率分布を考慮する。現行の排水計画の水理性能は、超過確率によりある確率より大きい(小さい)という条件を与えるだけで信頼区間を与えない。変数の確率分布を考えれば、水理設計において従来の上限または下限から信頼区間を示す指標で性能評価をすることが考えられる。そこで次節以降では、構造性能を参考に水理性能の信頼性設計法を考える。

2 包括コードと性能設計法

ここではまず、包括設計コードにおける性能の位置づけを要約する。

a 作用

作用は、時間変化に応じて次のように分類される。

- 永続作用 (G)
- 変動作用 (Q)
- 偶発作用 (A)
- ・ 永続作用は、与えられた基準期間を通して、連続的に作用する傾向のあるものであり、その大きさの経時的変化は、その平均値に比較して無視できるもの、又は作用の変動が一方的であり限界値となっているものである。
- ・ 変動作用は、平均値に関してその大きさの経時的変化が無視できないもの、あるいは単調ではないものである。
- ・ 偶発作用は、与えられた基準期間内には構造物に対して大きな値では滅多に生じないものである。

b 性能照査の諸条件と種類

性能照査の方法には、Table 4の種類のアプローチがある。

基本性能には、Table 5の種類がある。

確率分布の取扱いの違いで信頼性設計法には、Table 6の3つのアプローチがある。

推奨される性能照査法には、Table 7の種類がある。

性能劣化の原因となる想定される作用素にはTable 8の種類がある。

以上は、構造性能を対象にしている。ここでは、水理性能を対象にした場合を考える。

Table 4はそのまま水理性能でも使える。

水理性能と構造性能の境界にある流体力や波力による構造破壊は、ISO2394では構造性能に含まれている。水理性能からこの部分を除外して考えれば、Table 5の安

全性に関する水理性能の検討は不要になるので、「修復性」と「使用性」のみを考えればよい。2011年3月11日の津波を例にとれば、排水施設の修復性を考えるには津波被災後塩水に浸って動かなくなったポンプ、変形して作動しなくなった排水樋門、瓦礫に埋まった排水路の復旧が重要な課題である。これほどの破壊を除いても、部品の共通化などは、修復を容易にする方法である。排水施設の使用性では3月11日の津波で防潮水門の操作にかかわった人が多数亡くなっているため、遠隔操作を可能にすることが求められている。また、排水施設の適切な管理(起動、停止)を支援する監視情報システムも重要で

Table 4 土木学会の包括設計コードによる性能照査アプローチの種類

Kinds of performance approach of design of general design code by JACE

アプローチ	内容
照査アプローチA	設計者は、性能規定を一定のある適当な信頼性で満足することを示す。
照査アプローチB	設計者は、当該構造物の事業者が指定する固有基本コード等に基づいて性能を照査する。

Table 5 基本的要求性能
Requested basic performance

性能種類	要求性能
安全性	非常に大きな損傷が発生するものの、損傷の範囲が人命や背後圏の財産に大きな影響を及ぼさないこと
修復性	ある程度の修復が必要となるが、比較的短期間のうちに機能を再び発揮することが可能であること
使用性	僅かな修復をおこなうことにより速やかに機能が発揮できること

Table 6 信頼性設計法の3つのレベル
Three levels of performance approach of design

設計水準	安全性照査式	確率分布	制御パラメータ
レベル3	構造物の破壊確率 ≤ 水準	実分布	破壊確率
レベル2	信頼性指標 ≥ 水準	正規分布	信頼性指標
レベル1	安全率 ≥ 水準	なし	設計用値

Table 7 推奨される性能照査法
Recommended performance approach of design

設計状態	主たる作用	推奨される性能照査手法
永続状態	自重、土圧、水圧、載荷重、波浪、波、船舶による作用	信頼性設計法
変動状態	レベル1地震動	信頼性設計法 地盤-構造物の動的相互作用を考慮した非線形地震応答解析 簡易法
偶発状態	レベル2地震動、津波、船舶の衝突、偶発作用としての波浪等	数値解析法(変形量や損傷程度を具体的に評価)

Table 8 主な作用の分類
Classification of major outer forces

作用種類	定義	施設に求められる性能
永続作用	自重、土圧、温度応力、腐食・凍結融解などの環境作用等	使用性
変動作用	波浪、波、水位(潮位)、貨物・車両などによる載荷重、船舶の接岸・牽引作用、レベル1地震動等	使用性
偶発作用	接岸以外の船舶等の衝突、火災、津波、レベル2地震動、偶発作用の波浪等	使用性、修復性、安全性

ある。特に、用排水兼用施設などでは、豪雨の前に予備排水を行う場合もあり、判断の誤り（予備排水の空振り）が濁水の危険度を増すこともある。

Table 6の信頼性性能法の3つのレベルは想定する確率分布による違いと考えれば、そのまま、水理性能で利用できる。

Table 7は構造物が壊れないことを前提とした性能照査になっているので、水理性能に使うことができない。「構造物が壊れないこと」が構造性能であれば、同レベルの水理性能は「流量が流れること」であると思われる。この点は後で詳細に検討する。

Table 8の主な作用素では、水理性能に「永続作用」と「変動作用」はそのまま使える。取扱いの難しい事項は「偶発作用」である。地震で排水機場が破壊される場合は、ISO2394の下の構造性能で検討される。このため、水理性能は、構造性能の信頼性設計法と組み合わせて使うが必要になる。地震で排水路が折れ曲がると、流れが阻害され、流量が減少するが、この点も構造性能法で統一的に検討すべき事項である。問題は、2011年3月11日の東日本大震災のように、地震で地盤沈下が発生した場合である。地盤強度は、性能評価の対象物になっていない。しかし、地盤が沈下すると、湛水が大きくなり排水不良になる。この点では、排水計画の水理性能として評価する必要がある。そうすると、上記のTable 7の性能照査手法で、偶発作用が無視できると考えたことは不正確で、排水機場などの対象構造物に直接的働く、偶発作用は無視できるが、地盤沈下のような間接的な偶発作用は、考慮する必要がある。

3 EUの洪水安全設計法

文献調査を行った結果、現時点では、排水計画の信頼性設計法を取り扱った事例はない。最も近い事例にEUの海岸堤防の安全性を評価する手法があった。これは、堤防が崩壊するリスクを問題にしているもので、構造性能の検討であるが、堤防が崩壊する原因は越流などの水理現象であること、リスクの評価が洪水による湛水である点は排水計画と共通点がある。そこで、まず、この事例を紹介することから水理性能の検討を進める。

EUが統一してユーロコードを定めたように、EUの災害対策の研究は国際共同研究の形を取り、共通化・標準化を推し進めている。Floodsite (Delft Univ.2008)、RASPなどが代表的なものである。RASP (Risk Assessment for Strategic Planning) (Sayersら、2005)は、英国の防災計画の基本理念である。RASPの名称からは、防災に関する全般的な計画理念であるが、RASPの実態は、堤防の洪水決壊に対する安全度管理計画である。この点では、構造物の安全設計に集中している。

以下、RASPの基本概念を4つに分けて要約する。詳細はSayersら(2005)を参照されたい。

a S-P-R概念

洪水の安全度はS (Source発生源, 外力), P (Pathway, 防御, 抗力), R (Receptor, 被災者, 被害) 概念を用いて検討される。これは、Fig.3 (Office of Public Works, 2009a, 2009b) に示すように、災害のS (発生源)である海、河川の洪水が、P (堤防などの防御)を通じて、最終的なR (氾濫原の住民などの被災者, 被害)を引き起こすと考える。高潮潮位のようなSの外力は負荷(Load)の確率分布で与えられる。P (抗力)を通じて、外力の確率分布は変形される。例えば、堤防の天端標高より低い高潮は、パイピングなどで堤防が決壊する確率を除けば、堤防でほぼカットされる。堤防 (P) を越えた流量の確率分布が与えられれば、Rでの湛水深が与えられる。Rの湛水深はRの被害額に変換される。

建物の性能では、外力は、地震の発生源から、固体である地盤を通じて、検討対象物に達する。この場合、力の伝播過程には選択の余地はない。また、建物の場合は守るべき対象は建物そのものである。

一方、海岸堤防の場合は、防御すべき対象は、堤防の背後の人命と財産である。堤防が崩壊して海から海水が浸入した場合、被害は湛水により起こされる。つまり、守るべき対象と構造性能を評価する構造物は別である。また、堤防は1カ所が崩壊すれば被災するように、性能は複数の施設が連携して初めて発揮される。1章で述べたように水理機能では、システムとしての性能評価が必須の条件になる。こうした複雑な状況の性能を統一的に解析するためにRASPでは、S-P-R概念を導入している。

b 限界状態関数

堤防の崩壊は状態限界関数Zで判定する。

$$Z = St - Ld \quad (1)$$

St: 構造物の強度 (Strength抗力) を総合化した指標である。

Ld: 構造物に働く負荷 (Load外力) を総合化した指標である。

Z: 限界関数。Z>=0の場合、防御施設は崩壊しない。Z<0の場合、防御施設は崩壊する。

Z, St, Ldと確率分布の関係はTable 6で整理されている。

c リスクの階層レベル

RASPによるリスクの評価は次の階層に分けられる。

1) 国レベル

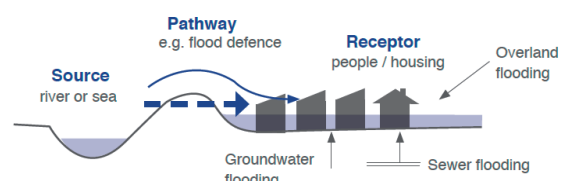


Fig.3 Source-Pathway-Receptor (Sayersら、2005)
Source-Pathway-Receptor

- 2) 水系レベル (流域, 河口, 海岸の集合体)
- 3) 部分水系レベル (部分流域, 湾単位の海岸の集合体)
- 4) 地区レベル (アセット調査対象地区)

水理性能でも, レベルによる階層分けは有効である。

d パス解析

堤防の崩壊では, 崩壊の原因ごとのパスを考えモデル化する。パスには次のようなものを考える。

陸側の円弧すべり; 海側の円弧すべり; パイピング; 越波; 軟化; 前浜の浸食

排水計画の場合, 堤防の崩壊のように, 各パスが独立して性能低下につながるような要素はない。しかし, 性能低下の原因としては, ポンプの能力低下, 排水路の通水能力低下などが考えられ, これらが合成して, 最終的な性能が決まる。性能劣化因子という点では, パス解析と同等なので, 以下, パス解析と呼ぶことにする。

4 水理機能の信頼性設計法の可能性

以上から, 確率変数を考えれば水理性能に信頼性設計法を導入することが可能である。既に, 筆者ら (丹治ら, 2011) は限界性能の式を使って, 排水機場の性能を次のように定式化してきた。

排水機場の排水能力は, 排水機場の掃出し水量と排水機場への排水路からの流入量で決まる

(流入量 > 掃出し水量) の場合は, 湛水位が上昇し,

(流入量 < 掃出し水量) の場合は, 湛水位が下降する。

これから, 単純に考えれば, S_t が排水ポンプの掃出し流量, L_d が排水路の流入量, Z を $S_t - L_d$ と置けば, 信頼性評価が可能である。

しかし, この方法は, 無湛水を性能にしており, 現行の基準のように, 許容湛水を考慮していない。また, この方法では, 性能に係る複雑なパラメータが十分考慮されていない欠点がある。この問題解決には, S-P-R のように排水の性能表を体系化することが望ましい。

また, 構造性能の検討から, 構造性能と水理性能の境界では, 持ち分を明確化した方が良いと思われる。

Table 9 に RASP と排水計画に S-P-R を用いた場合の考えられる対応を示す。RASP では, 川または海からの外水を想定していて, Pathway として堤防を想定している。排水計画は, 内水を対象としていて, Pathway は排水施設になる。Receptor はほぼ共通にとれる。こうして見ると S-P-R を排水計画で考えることは可能である。

個別に考察すると, 構造物に働く流体力は, ISO2394 の下に, 体系化が進んでいるので, 水理性能から除外して, 考えるべきである。その結果, 構造物が壊れることは, 検討対象から除外される。

その結果, 水理性能は, 第1に必要とする流量が流れることに集約できる。ただし, 生態系の影響などでは, 水深や流速分布も問題になろう。しかし, これは, 今後の課題にし, 差し当たりの検討対象から除外する。

排水路から農地への越流を考えると, 水位も水理性能

に含むべきという考え方もできる。また, 性能規定的に考えれば, 排水計画は, 洪水による湛水被害を最小にすることを目標とすべきであるという考え方もある。つまり, 性能規定により, 信頼性評価を行うべき変数を, 流量以外に変更する可能性がある。

S-P-R では, R として氾濫原にする住民を想定し, まず, 湛水深の確率分布を求め, 被害額の確率分布を求めている。排水計画の設計の目的も洪水防止なので, R としては同じ確率変数をとることが合理的である。

排水計画の性能規定を堤防の構造性能規定と同じ, 湛水が生じないことに設定した場合, 湛水が生じる原因には, 堤防の崩壊, 排水機場の地震による破壊などの構造性能の低下による性能低下と, 排水能力の不足などの水理性能の低下による湛水の発生との2系統のパスが存在することになる。つまり, パス解析によって, 構造性能と水理性能は1つに体系化可能である。

性能評価は, 湛水深と湛水面積でなされる必要がある。これは, 農地排水では, 全面積の湛水防止のための排水が困難な場合には, ある面積の湛水を許容して, 排水ポンプ規模を小さくするためである。地区の全面積について, 湛水深別の湛水面積のヒストグラムを作成して, これを **Fig.4** の密度関数にスムーズ化したものを「湛水面積曲線」と呼ぶことにする。排水計画の性能は湛水面積曲線で表すことができる。湛水面積曲線の下側の面積を積分すれば, 総湛水量になる。**Fig.4** では, ここでは, 時間を考慮していないので, 洪水期を通じた最大湛水を示している。

同じ総湛水量に対して, 複数の湛水面積曲線を与えることが可能である。総湛水量が同じ湛水面積曲線群を「等量湛水面積曲線」と呼ぶことにする。床上浸水が床下浸水よりも経済被害が大きいように, 総湛水量が等量の場合

Table 9 排水計画の S-P-R
S-P-R of Drainage facilities

S-P-R	Source	Pathway	Receptor
RASP	川・海 (外水)	堤防	背後低地
排水計画	降雨 (内水)	排水施設	低地

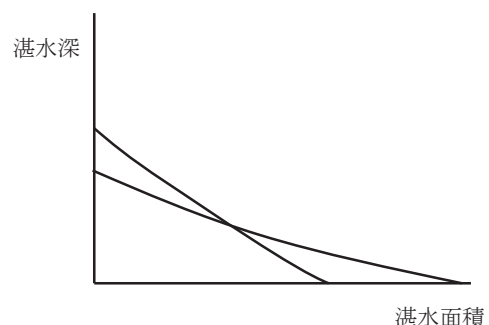


Fig.4 地区全体の湛水面積曲線群の例
Example of inundation-area curves of the whole area

合、湛水深の分布が大きな値に偏っている方の被害が大きくなる。仮に、被害額が同じ、湛水面積曲線群を「等価湛水面積曲線」と呼ぶことにしたとすれば、「等価湛水面積曲線」と「等量湛水面積曲線」は異なった曲線群になる。

一般に、投資額が大きくなり、施設容量が大きくなると性能が良くなるが、排水計画では例外がある。同じ総湛水量であれば、排水路の通水能力を抑えて、湛水を分散させる（いわゆる持たせ）ことで、湛水被害を軽減することが可能である。この場合、排水路の通水能力を抑えることを単純に排水路断面積で行えば小さい断面積の低い整備水準の方が、被害が小さくなる。一方、排水路の断面は大きくして、排水路内の調整ゲートで通水能力を押さえる場合には、排水路の整備水準は高いままである。地区内の降雨の分布は予測できず、湛水を分散させるには、排水路断面を小さくするのではなく、調整ゲートによる排水管理が有効である。この検討は、降雨分布を変化させて性能を確認しながら設計するか、排水路の水位管理の自由度の概念を性能に導入することで解決する必要がある。

Fig.4の曲線の1本を、時間経過を考慮して表現すると、Fig.5のように、時間軸を追加すればよい。図ではある一つの排水イベントは図中に矢印で表すような軌跡を取る。複数のイベントをFig.5に書き、湛水深と湛水面積の和が最大の点を結ぶとFig.5の表面が与えられる。ただし、この図では発生確率の違いは表れないので、必要であれば色の濃淡で表すとよい。

IV 排水計画の一般化の提案

1 全体の手順

以上のように信頼性設計法を前提とすれば、現在の排水計画をより一般化することが考えられる。以下に示すものは例示であるが、今後検討のたたき台になると考える。

排水計画に信頼性設計法を導入する場合、設計手順そのものは大きく変わらない。大きな変化は以下であろう。

- 1) 降雨に確率分布が導入される。
- 2) パラメータに確率分布を導入する。
- 3) 性能評価に確率分布が導入される。

RASPでは、性能評価は、背後低地の湛水深さを計算したあとで、被害額や対策額が計算される。RASPは、湛水が予想される場合、排水能力を強化する方法と、土地利用の誘導により、高いリスクの地点には、資産を置かないような開発規制をする方法を考える。洪水対策の場合には、このように湛水と被害・対策費用は1対1の対応をなさないため、性能評価は、前章で述べた湛水の評価と本章で述べる被災の経済評価に分けて2段階で行うことが合理的である。

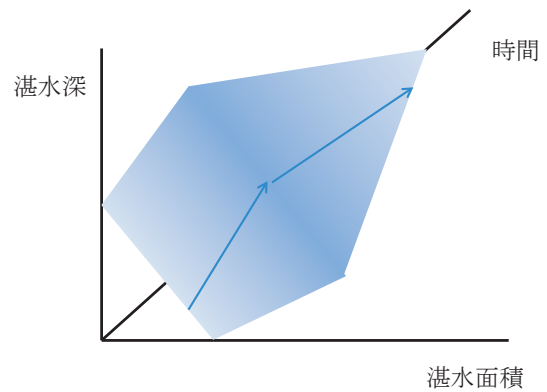


Fig.5 地区全体の湛水面積曲線の時間変化
Time variance of inundation-area curves of the whole area

2 S-P-Rの導入

ここでは、排水計画の水理性能を信頼性設計法で評価する方法を、構造性能の信頼性設計法、特に、EUの堤防の構造性能のRASPを参考に検討する。

性能評価を行う場合には、まず、レベルとパスを特定する必要がある。

パスは性能が劣化する経路である。海岸堤防の性能では、これは、「越流による堤防の崩壊」、「パイピングによる堤防の崩壊」など劣化原因を指す。排水計画で、「受益地の地盤沈下」、「ポンプの能力低下」などがパスになる。パスは解析の精度を支配する。

レベルは解析対象の大きさを指す。「排水機場周辺」、「部分流域」、「全流域」、「複数流域を含む地域全体」のように順に面積が大きくなる。面積が大きくなるにつれて、モデルは簡略化され、影響の小さなパスは無視される。

ここでは、排水計画の水理性能を、S-P-Rの枠組みで考えてみる。

Sは、外力の発生源で、内水排除の場合には、降雨が相当する。

Rは洪水の湛水である。湛水の評価方法には、最大湛水深を取るなど、複数の評価方法が考えられる。農地排水では、ある面積割合まで湛水を許容することがある。この点を配慮して、ここでは、湛水を「湛水面積曲線」で評価する方法を提案する。

Pには湛水を左右する要素である、ポンプの排水能力（排水性能曲線）、外水位、吸水槽の最大管理水位、吸水槽の起動水位、排水路断面、粗度係数、調節ゲート、受益地区の地盤標高、土地利用が含まれる。以上のS-P-Rを用いれば、排水計画の信頼性設計法が可能になる。

今まで、筆者らは水理性能を限界状態でモデル化してきた（丹治ら、2011）が、性能が湛水面積曲線のような2次元の値で表される場合には、限界状態のように性能を1つのスカラーで要約するモデルには無理がある。この点では、S-P-R概念がより進んでいる。

3 湛水評価指標の一般化

前章では、湛水面積曲線で、性能を評価する方法を考えた。しかし、この方法では持たせの評価が難しい。以下に、例を示す。Fig.6では、ブロックBで集中的な降雨があったとする。この場合、Bの排水路の水位を下げる事が重要で、Bの下流の2つの△で示したゲートは全開にする。一方、降雨の少ないAでは2つの△で示したゲートを閉めて、排水路の水位を上げて、下流への排水負荷を軽減すべきである。現実の排水設計では、地区内で均一の降雨が用いられるため、こうした持たせの検討はほとんどなされていない。しかし、最近では、マスコミでゲリラ豪雨などと呼ばれるFlash floodが大きな問題になっている。排水計画において、Flash floodに対応するには、降雨の空間分布の想定が必要と思われる。

そこで、Fig.4, 5を一般化する。最近では、湛水分布はGIS上に表現される。GIS上ではポリゴンまたはメッシュでサブブロックが表される。あるサブブロックの時刻tの湛水深さI(t)は(2)式で表現できる。

$$I(t) = f(t, L, B, R, O) \quad (2)$$

ここに、

t : 時刻

L : 土地利用, 地盤標高

B : 流域変数 (外水位, ポンプ容量, 吸い込み水位, 停止水位, 排水路断面, 排水路粗度係数, 地目による損失降雨など)

R : 降雨パラメータ (計画降雨の時間と空間確率分布)

O : 操作パラメータ (排水ポンプの操作方法, 調整ゲートの開閉方法, 水位モニタリングと制御方法)

I(t)の確率分布をモンテカルロシミュレーションで求めて、信頼区間を算出する場合には、1) 何を変動させるか、2) 変数の確率分布の与え方が問題になる。

まず、2)では、Oは確率分布では表現できない。次に1)では、土地関係の実線の下線を引いた変数はほぼ定数に

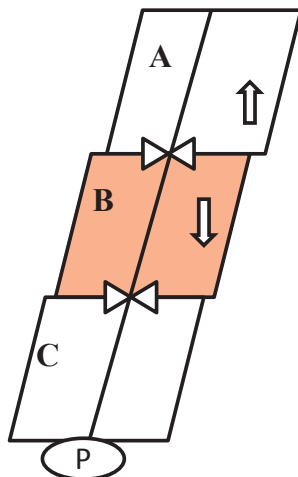


Fig.6 降雨分布への対応
Adjustment to rainfall distribution

なる。盛土は例外になる。次に点線の下線を引いた変数はある評価対象の排水施設を1つに絞れば、その範囲では定数と見なせる。この排水施設の変数セットに、降雨と外水位の確率分布を与えてモンテカルロシミュレーションを行えばI(t)の確率分布を求めることができる。これが性能評価指標の算出になる。持たせ(調整ゲートの操作)を考えた場合、Oの部分だけは、信頼性設計法では処理できない。以上のように1)の何を変動させるかに基づいた変数の階層分けをグレードという名称でTable 10に整理した。

また、現在、排水ポンプの操作方法では吸水槽の水位を見ているが、調整ゲートと連動させて、流域内の複数の水位を考慮した運転も可能である。この場合も、確率表現は難しい。

なお、Aug and Amin (1969)が扱った設計・施工における誤差が考慮されていないので今後は、この点も考慮すべきである。

4 一般の損傷関数

排水計画の性能を湛水から金銭被害に変換するためには湛水深さを金銭被害に変換する関数が必要になる。こうした負荷(湛水)を被害金額に結び付ける場合、被害が発生するかしないかの境界付近では、同じ負荷に対する被害が分散する。このような被害の不確実性を表現する一般的な手法に損傷関数がある。

損傷関数 Fragility function, 損傷曲線 Fragility curveとは横軸に荷重等の負荷を、縦軸に崩壊確率を取ったFig.7の関数である。損傷関数が得られれば、高潮等の

Table 10 排水計画の変数のグレード
Grades of drainage design parameters

グレード	項目
1	L土地利用, L地盤標高, B地目による損失降雨
2	Bポンプ容量, B吸い込み水位, B停止水位, B排水路断面, B排水路粗度係数
3	B外水位の時間分布, R計画降雨の時間と空間確率分布
4	O排水ポンプの操作方法, O調整ゲートの開閉方法, O水位モニタリングと制御方法

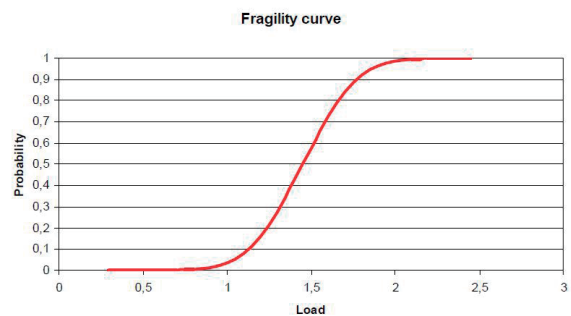


Fig.7 損傷関数の例
Example of fragility function

負荷が与えられた場合の堤防の崩壊確率が求められる。

健全度が悪化すると同じ負荷に対して、崩壊する確率が高くなるので、曲線は左に移動する。一方、補修をすれば、強度が増すので、曲線は、右に移動する。この時、曲線の平行移動だけでなく、曲率等の形状も変化するであろうが、差し当たり単純化のために無視すれば、健全度の変化は、損傷曲線のx軸の移動量として、定式化できる。この点で、損傷曲線の決定ができれば、後述するように維持管理の結果変わる健全度を施設寿命の変化に変換して、LCC (Life Cycle Cost ライフ サイクル コスト) やB/C (費用対効果分析) の計算につなげていくことができる。

5 排水性能の損傷関数

排水計画の性能は第1に土地の湛水深で規定される。水田であれば、24時間30cm以下の湛水が設計要件になっている。ここでは、性能の定義を明確にする。24時間30cm以下という数字は、安全率の数字である。これは、ポット試験を行った結果、この数字以下であれば、水稻の減収が認められないと判断して決められた。30cmという数字は、概ね稲穂(花)が水面上に出ている条件である。仮に、現在の排水施設が、24時間30cm以下では排水出来ない面積が受益面積の20%あったとする。この場合の湛水が、24時間35cm以下であった場合、水稻の被害を考える。30cmが稲穂の高さであることを考えれば、稲穂の高さは植物体でばらつくので、30cm以上35cm以下でも被害の出ない植物体もあると思われる。つまり、24時間30cm以下を越えたからといって、収量はすぐにはゼロにはならない。また、背丈の小さな植物体では、30cm以下でも収量被害が発生する。このように、24時間30cm以下という判定基準は、湛水を減らして、洪水が作物の収量に与える影響を軽減するという実際に発揮された性能を正しく反映していない。Fig.8は水田の湛水の損傷度関数を示す。水田の湛水被害の損傷関数は2次元になっている。S-P-R概念に対応した損傷関数になっている。実際に発揮された性能は、このように角張った形でなく、緩やかに変化する。損傷度も0と1の2値ではなく、中間の値を取り、それは損傷確率を表す。2値の損傷関数は取扱いの利便性を優先して、余りに単純化されすぎている。損傷関数が累積確率関数として与えられればより実態に近い性能設計が可能になる。また、30cmを判断基準にすることは、稲の草丈が伸びきっている開花(8月初旬)次期以降の被災を前提としている。これ以前の被災には、草丈の成長関数を入れるべきである。

6 確率変数による統合

4節で、信頼性評価とLCCとB/Cの関係を述べたので、補足する。まず、信頼性設計法、LCC、B/CをS-P-Rの枠組みで表現するとFig.9になる。最上段は検討の初期値である。ここで、S、P、Rの変数の特徴を変動値(確

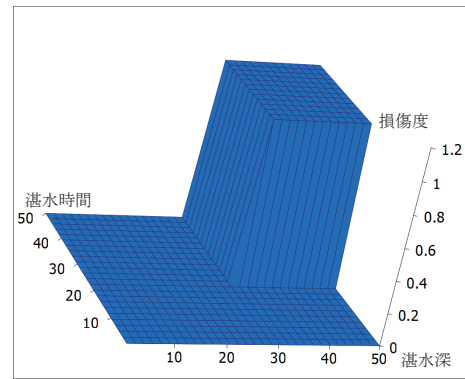


Fig.8 洪水の水田損傷関数
Fragility function of paddy fields by flood

率変数)と固定値(スカラー)に分けて考える。信頼性設計法では、ある設計P1に対して外力の変動と被害減少の変動(ΔR)を求めるので2段目になる。LCCでは、外力がシナリオで固定され、維持管理の変更により施設性能の変化($\Delta P1$)が与えられ、被害軽減効果の2回差分($\Delta \Delta R$)で、維持管理効果が評価されるので3段目になる。4段目の費用対効果分析(B/C)では、S、P、Rが設定され、B/Cが1.2を超すこと求められる。

費用対効果分析は独占市場において、市場の資源最適配分機能を代替するために行われるので、1.2以上といった固定値による判断は手法の誤用である。費用対効果分析では、複数の設計案(P)に対して、費用対効果分析の値の比較を行うことが正用法である。この場合一つの設計案(P1)が信頼性設計法で設計されれば、SとRは自動的に確率変数になる。したがって、Fig.9の下から2段目(上から4段目)の費用対効果分析は、最下段のように、S、P、Rのすべてを変動値とした費用対効果分析に統合化される。LCCは既に述べてきたように損傷関数を介して、費用対効果分析に統合化できる。損傷関数は厳密に扱うと同定は難しいが、2値関数を連続関数で置き換えたものと考えれば損傷関数の決定は比較的容易である。

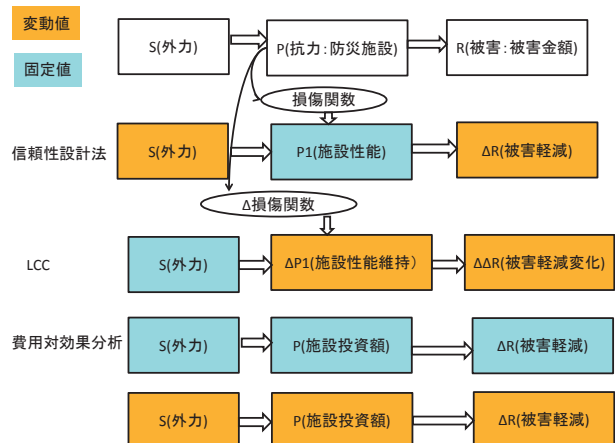


Fig.9 S-P-Rによる統合化
Generalization by S-P-R framework

V 結 言

設計に発現する機能に関する確率的な概念を導入する場合には、「性能設計法」と「信頼性設計法」という用語が使われる。性能設計法は、第1にISO2394の基で、施設の構造性能を規定する場合に使われる用語である。第2にWTO/TBTの下で仕様設計の反対語として用いられる。しかし、後者の事例は少ないので、混乱を避けるために、水理性能については、性能設計法という用語を使わず、信頼性設計法を使う方がよい。

信頼性設計法は、設計のパラメータの確率分布を考慮した設計法で水理性能に適用可能である。

ここでは、排水計画の水理性能を信頼性設計法で評価する方法を、構造性能の信頼性設計法、特に、EUの堤防の構造性能のRASPを参考に検討した。

ISO2394で流れ・波浪による構造物に対する外力は構造性能の基に体系化されている。したがって、この部分は水理性能として検討する必要はない。そうすると、流体力による施設の破壊は検討対象外で、流量と水圧の分布だけを考えればよい。

排水計画の水理性能について、構造物のS-P-Rに準じて水理性能を定義した。

水理性能の信頼性設計法では、確率分布を与えることで性能評価指標（湛水の評価指標）の確率分布を求めることができる。

Sは時間空間分布確率を考えた降雨である。

Pには湛水を左右する要素である、ポンプの排水能力（排水性能曲線）、外水位、吸水槽の最大管理水位、吸水槽の起動水位、排水路断面、粗度係数、調節ゲート、受益地区の地盤標高、土地利用が含まれる。

Rは第1に湛水指標で評価し、次に損失関数を与えて、経済評価を行う。

以上のS-P-Rを用いれば、排水計画の信頼性設計法は可能と思われる。

ただし、排水ポンプの操作方法と調整ゲートの操作は、確率表現が難しいので、前提として与えざるを得ない。

なお、以上の処理で、損傷関数は、費用対効果分析に、信頼性設計法やLCCを統合する場合にキーになる概念と思われる。

参考文献

- 1) Ang, A. H-S and N. Amin (1969) : Safety factors and probability in structural design, *Proc. ASCE*, **95**, ST7, 1389-1405
- 2) Delft Univ. (2008) : Principal Deltares Purchasing Support Department : SAFECOAST ACTION 3A-Trends in flood risk, http://www.safecoast.org/editor/databank/File/rapport_SAFECOAST_final%2017-07-2008%281%29.pdf
- 3) Freudenthal, A. M. (1947) : The safety of structures, *Trans. ASCE*, **112**, 125-159
- 4) Hall (2003) : Risk performance and uncertainty in flood and coastal defense – a review, R&D Technical Report FD2302/TR1, Delft / Environment Agency
- 5) ISO (1998) : ISO 2394 General principles on reliability for structures, 73p.
- 6) Kolsky, P., Bulter, D. (2002) : Performance indicators for urban storm drainage in developing countries, *Urban water*, **4**, 137-144
- 7) Office of Public Works (2009a) : The Planning System and Flood Risk Management - Guidelines for Planning Authorities (Nov 09), Ireland Government
<http://www.environ.ie/en/Publications/DevelopmentandHousing/Planning/>
- 8) Office of Public Works (2009b) : The Planning System and Flood Risk Management - Guidelines for Planning Authorities - Technical Appendices (Nov 09), Ireland Government
<http://www.environ.ie/en/Publications/DevelopmentandHousing/Planning/>
- 9) Rackwitz, R., (1979) : Comitté Eurpéan du Beton, Bulltin D'Information, **No.112**, Munich, West Germany
- 10) Sayers P. and I. Meadowcroft (2005) : RASP- A hierarchy of risk-based method and their application, Delta flood and coastal management conference, University of York
- 11) SEAOC (1995) : Vision2000 ; performance based seismic engineering of buildings, San Francisco
- 12) 石川浩 (1982) : 機械・構造物の信頼性設計理論, 材料, 31(345), 527-537
- 13) 国土交通省 (2002) : 土木・建築にかかる設計の基本, 30p.
- 14) 国土交通省 (2007) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (2007年版)
- 15) 国土交通省 (2012) : 「港湾の施設の技術上の基準・同解説 (2007年版)」の部分改訂
- 16) 国土技術政策総合研究所・港湾空港技術研究所 (2005) : 性能設計と信頼性設計について (案), 13p.
- 17) 合田良実 (1997) : 設計波高さおよび設計潮位の決め方, 第33回水工学に関する夏期研修会講義集, B-4, 1-18
- 18) 丹治肇・桐博英・小林慎太郎 (2011) : 沿岸排水機場のレベル2性能設計法の検討土木学会論文集, B2(海岸工学) 67(2), 1.821-1.825
- 19) 土木学会 (2003) : 性能設計の概念に基づいた構造物設計コード作成のための原則・指針と用語, 38p.
- 20) 土木学会 (2008) : 性能設計における土木構造物に対する作用の指針, 21p.
- 21) 農業土木学会 (1978) : 汎用農地化のための指針, 130p.
- 22) 農業農村工学会 (2006) : 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説, 計画 排水, 151p.
- 23) 星谷勝・石井清 (1986) : 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 208p.
- 24) 古田均・白木渡・本城勇介・佐藤尚文 (2009) : 性能設計における作用指針, 土木学会論文集F, 65(4), 473-484
- 25) 松井謙二 (2012) : 設計の認証, 土木ISOジャーナル, 23,

26-29

土木ISOジャーナル, 23, 1-2

26) 横田弘 (2012) : 国際標準化に向けて持つべき戦略とは,

受理年月日 平成24年12月7日

Concept of Reliability Approach of Hydraulic Design of Drainage Plan

TANJI Hajime, KIRI Hirohide and NAKAYA Tetsuo

Summary

Concept of performance approach of design of a drainage pumping station is proposed. First, ISO2394 and related document of performance approach of design of structure was reviewed. Terminology and basic concept of performance approach was summarized. Performance approach is only used for structure design. This paper proposed reliability approach of design based on Source-Pathway-Receptor concept of structure design of flood protection dykes. Source is expressed as rainfall. Receptor is expressed as people and goods on a flood plain. Pathway express as outer water level, capacity of pumps, an initial water level of inlet of pumps, a stopping water level of inlet of pumps, cross sections of drainage canals, manning's coefficients of drainage canals gates, land use and land levels of areas. By giving probability distribution of these parameters, reliability approach of drainage pumping stations can be designed.

Keywords : Performance approach of design, reliability approach of design, S-P-R concept, hydraulic performance, ISO2394