

米国陸軍工兵隊による洪水被害のリスク分析手法

板垣 修* 吉谷純一**

1. はじめに

米国では洪水被害低減のための河川堤防の整備事業を州政府、連邦政府等が分担して実施している。連邦政府機関の一つである陸軍工兵隊（US Army Corps of Engineers、以下「工兵隊」）はミシシッピ川等の堤防整備を実施している。

筆者らは工兵隊による洪水被害のリスク分析手法の文献調査を実施し、さらに第一筆者は2012年2～3月及び5月にカリフォルニア州デイビスにある工兵隊 HEC（Hydrologic Engineering Center：水文工学センター）、サクラメントにある工兵隊サクラメント地区事務所（Sacramento District Office）及び同管内等を訪問し調査（写真-1）したので、結果を報告する。

2. 工兵隊におけるリスク分析手法の導入

1996年以降工兵隊に導入されたリスク分析手法と同導入以前の手法との違いについて、HECのMcPherson水資源システム部門長は5月の調査時にHECで開催されたワークショップ「RISK ANALYSIS FOR FLOOD DAMAGE REDUCTION PROJECTS」（洪水被害低減プロジェクトのためのリスク分析、以下「2012年

ワークショップ」）で次のとおり述べている。「2つの同じ河道断面を想定してみよう。1つは緩勾配河川で流量－水位関係の変動が小さく長期間の水文観測記録があり、もう1つは急勾配河川で流量－水位関係の変動が大きく短期間の水文観測記録しかない。1996年以前の手法では両者を同一として扱うが、リスク分析手法では明示的に両者を区別し、プロジェクトの機能発揮に係るリスクの首尾一貫した取扱いをより確かなものとする。」

Davis等（2008）¹⁾に基づき工兵隊におけるリスク分析手法導入経緯を整理すると次のとおりである。

1991年にHECが開催したワークショップにおいてリスク分析手法が形作られはじめた。

同ワークショップでDavisは水文工学、洪水被害、リスク及び不確実性の観点からリスク分析手法の概念を整理し、具体的計算手順を提案し適用例を示した²⁾。

また、Moserはプロジェクトの工学的・経済的機能発揮に関するリスクと不確実性の情報を共有し、同情報を踏まえたプロジェクトの決定が必要であるとした²⁾。

その後、リスク分析に関する政策助言が工兵隊の技術回覧「洪水被害低減調査における水理水文・経済評価のためのリスクに基づく分析（Risk-Based Analysis for Evaluation of Hydrology/Hydraulics and Economics in Flood Damage Reduction Studies）」（EC1105-2-205）として1992年に発出され、多くの批判的意見が同地区・地方事務所から寄せられた。続く5年間に概念が明確化されツールと手法が開発されマニュアルと文書が用意されトレーニングが開催された。リスク分析手法は1996年の共同技術規則「洪水被害低減調査のためのリスク分析（RISK ANALYSIS FOR FLOOD DAMAGE REDUCTION STUDIES）」（ER1105-2-101（2006年改訂））及び技術マニュアル「洪水被害



写真-1 サクラメント地区事務所管内(サクラメント川)

Risk analysis for flood damage reduction projects by U.S. Army Corps of Engineers.

低減調査のためのリスクに基づく分析（RISK-BASED ANALYSIS FOR FLOOD DAMAGE REDUCTION STUDIES）」（EM1110-2-1619）により具体化し、同手法の導入・洗練が進められた。

一方、米国学術研究会議²はカリフォルニア州アメリカン川のAuburnダム計画による洪水被害軽減効果を評価するための委員会を1994年に設置し、工兵隊の事業提案をレビューした。同委員会は工兵隊によるリスク分析手法を「革新的で時宜を得て開発された」とし、「モデリングにおける不確定性を明示的に認識することは洪水リスクと被害軽減評価における不確定性のより良い理解につながる」と結論づけた。

米国学術研究会議の2000年発表の第2次報告書は「新たな手法は重要な一歩であり、工兵隊は複雑ではあるが現代的な手法を採用すべきであり、現在の科学の発展に追い越された伝統的な手法から抜け出すことが大いに推奨される」と結論づけた。

さらに、米国学術研究会議は2010年の報告書「Adapting to the Impacts of Climate Change」の143頁で「気候変動適応において、リスク管理手法は補足的な分析手段として重要性が増している」としている。

米国学術研究会議における肯定的な評価が、工兵隊におけるリスク分析手法の導入に貢献したものと考えられる。

3. 工兵隊のリスク分析手法の概要

3.1 リスク分析手法の流れ

ER1105-2-101、EM1110-2-1619に基づく工兵隊によるリスク分析手法の手順の概要は以下のとおりである。

- (1)洪水として一般に定常流を仮定し、洪水流量－超過確率関係、洪水流量－河道内水位関係（図-1参照）、河道内水位－被害額関係ごとに不確定性を定量的に解析する。

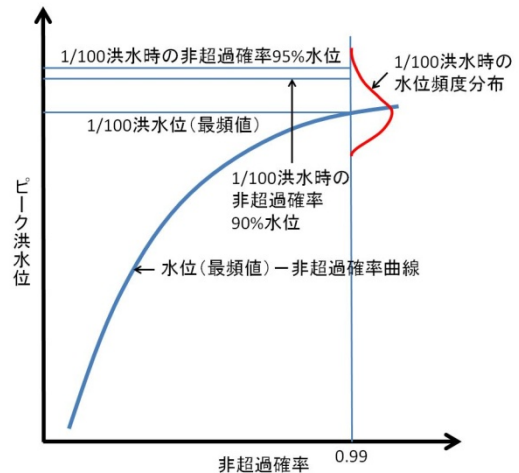


図-1 非超過確率－水位関係概念図 (Davis等 (2008) ¹⁾を参考に著者作成)

- (2) モンテカルロシミュレーションにより各関係を合成し、被害額－超過確率関係を算定する。
- (3) 年平均被害軽減期待額に加え、残余リスク、一定期間（50年間等）に施設能力を超過する確率等を算定する。
- (4) 上記算定結果等を踏まえ、工兵隊が推奨する洪水被害軽減対策案（通称NED（National Economic Development、国家経済開発）案）を求める。

なお、上記解析はHECが開発したHEC-FDA³を利用するなどして行っている。

3.2 不確定性⁴の反映手法

3.2.1 洪水流量－超過確率関係

洪水流量－超過確率関係に係る不確定性については1982年の米国内務省告示第17B号（Bulletin#17B）にその定量的反映手法が示されている。洪水流量－超過確率関係に対数ピアソンⅢ型分布を仮定（標準的手法）した場合には、ある超過確率における洪水流量の生起分布に非心t分布を想定することとしている。

3.2.2 洪水流量－河道内水位関係

洪水流量－河道内水位関係における不確定性については不明な点が多いため正規分布を仮定することが多いようである。洪水規模ごとに過去の痕跡水位を縦断方向に整理し、痕跡水位の95%が標

² National Research Council：1916年に米国科学アカデミー*により設置。同アカデミーの知識の深化と連邦政府への助言のために広範な科学技術分野を連合させることが設置目的。

* National Academy of Sciences：科学技術研究に従事している著名な学者による、科学技術の促進と公共の福祉に資する同利用のための民間の非営利団体。1863年に議会より本アカデミーの憲章に与えられた権威により連邦政府に科学技術面で助言することを付託されている。

³ HEC-FDA（Hydrologic Engineering Center - Flood Damage Analysis）：HECが開発した洪水被害軽減プロジェクトに係る便益算定ソフトウェア。2012年2～3、5月の調査時に面談した工兵隊地区事務所職員の多くが日頃使用。

⁴ ここでは生起確率を仮定するものについては「不確定性」、生起確率を仮定しないものについては「不確実性」とする。

準偏差の4倍の帯の中に入ると仮定し、同帯の幅を4で割って標準偏差を求める手法が2012年ワークショップで紹介されていた。

3.2.3 河道内水位－被害額関係

河道内水位から氾濫原の家屋の浸水深等を算出し被害額を評価する際に、堤防の機能発揮、建物の1階の床高さ、家具等を含めた浸水深－被害額関係等に係る不確定性を反映している。

堤防の機能発揮に係る不確定性についてはフラジリティカーブ（後述）により反映している。

破堤氾濫時の氾濫原内の浸水位分布は河道内水位と同一と近似する場合がある。なお、HEC-FDAではHEC-RAS（河川の水利計算プログラム）による定常流計算結果を用いており、出水継続時間等が異なる我が国への適用には注意が必要である。

3.2.4 フラジリティカーブ

本報告におけるフラジリティカーブとは「作用外力」（河道内水位）に対する「洪水防御機能を発揮できなくなる確率」（破堤確率）を想定される水位範囲について導出したものである。

調査時点で工兵隊が一般に用いているフラジリティカーブは技術マニュアル「RISK-BASED ANALYSIS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING FOR SUPPORT OF PLANNING STUDY (ETL1110-2-556)」（1999年）に基づく。破堤確率は、越水、浸透（堤体・基礎地盤）、浸食、滑りの破壊モードごとに河道内水位に応じた発生確率を算定し、いずれかが生起する確率とする。

フラジリティカーブは、解析による手法、過去の洪水時の機能発揮状況に基づく手法、技術者判断による手法のいずれか又はこれらの組合せにより求められている。サクラメント地区事務所の堤防技術者によれば、上記3手法を複合させたハイブリッド手法によっているとのことであるが、合意形成・対外説明には解析による手法が望ましいとのことであった。

解析による手法とは、堤体・基礎地盤の土質定数（透水係数、粘着力、内部摩擦角等）の平均値・標準偏差等に基づき、各土質定数が変動した場合について各安定計算を行い、同計算結果を合成することによりフラジリティカーブを導出する手法であり、計算に時間が掛かる。図-2に基礎地盤の浸透による破壊確率の工兵隊による解析例

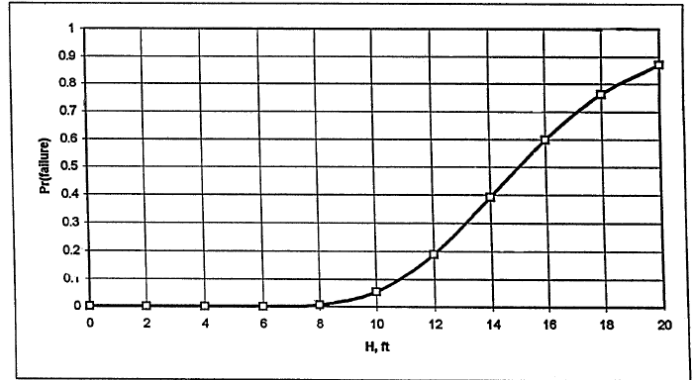


図-2 基礎地盤浸透破壊に係る解析例⁴⁾

（縦軸が破壊確率、横軸が河道内水位）を示す。

フラジリティカーブ導出には苦労が続いている様子が調査時に感じられた。2012年ワークショップにおいて、同カーブの解析には計算時間が掛かることなどから、代表的安全率（1.0等）となる河道内水位を各算定し、過去の出水時の機能発揮状況を考慮して簡便に導出する手法（Multi Point Estimate）が工兵隊リスク管理センター（Risk Management Center）のShewbridge上級土質工学リスク専門職より紹介されていた。

なお、一般に工兵隊ではフラジリティカーブ導出時に堤防の長さを考慮しておらず、一連の堤防区間で最も弱いと考えられる箇所又は破堤した場合に最も被害が大きいと考えられる断面について導出している。同長さの考慮手法の開発は優先順位が低く、過去の出水時の機能発揮状況が同導出上最も重要であるとのことであった。

4. おわりに

1996年以降工兵隊ではリスク分析手法を導入しているが、FEMA（Federal Emergency Management Agency：連邦緊急事態管理庁）⁵は
全米洪水保険制度⁶の堤防認証基準⁷を維持してい

⁵ 1979年に多数の災害関連機関を統合して設立。全国の自治体の自然・人為災害に関する準備・対応・復旧を支援。2003年に国土安全保障省（Department of Homeland Security）の一部となった。

⁶ National Flood Insurance Program：1968年に議会が創設した連邦政府のプログラム。FEMAが所掌。プログラムに参加している自治体内の家屋所有者、賃借人、企業所有者に洪水保険を提供。プログラムに参加する自治体はFEMAの要件と同等かこれを上回る条例を制定・施行し洪水リスクを低減させることに合意する必要がある。洪水保険の加入等は生命保険・損害保険会社経由で行われる。保険料率は各社統一。保険料率は建物の建設年月日・種別、洪水リスク等により決

る。これら2手法の並立は、リスク分析手法のみに基づく最適な洪水被害低減対策の設定が難しいことを示唆していると考えられ、リスク分析手法の精度・限界を踏まえた適用が重要と考えられる。

なお、1996年以前に工兵隊が洪水対策計画の対象としていた基準洪水（Standard Project Flood、流域で論理的に想定しうる最大洪水）は確率規模が明示されていないが、多くは再現期間500～1,000年と考えられている。全米洪水保険制度の堤防認証基準から洪水対策の目標レベルと見なされがちである再現期間100年の洪水は、上記基準洪水よりも流量規模が小さく、安全レベルの低下が指摘されている。リスク分析手法の導入により、再現期間100年の洪水に限定されない、同洪水を上回る幅広い規模の洪水を対象とした被害低減対策の検討が可能になっていると考えられ、これもリスク分析手法の導入意義の一つであると考えられる。

謝 辞

2012年2～3月及び5月の2回に亘る調査にご協力いただいた工兵隊HECのDunn所長、サクラメント地区事務所のKetchum土質設計課長、Gompers堤防安全課長、Perlea博士、Perlea土木職及びHECでのワークショップ参加者・事務

まる。洪水保険は建物と家財道具（衣服を含む）を対象とする。土地は対象外。高リスク地域（High-Risk-Areas、1%以上の年洪水確率を有する地域）の住宅・建物で連邦政府により規制・保証された貸し手による抵当権が設定されているものについては洪水保険に加入する必要がある。中・低リスク地域（Moderate-to-Low Risk Areas）の住宅・建物については洪水保険へ必ずしも加入する必要はないが加入が推奨される。

7 44 CFR (Code of Federal Regulations) Ch. I (10-1-02 Edition) (2002年) の第65.10条(b)(1)の(i)に「河川堤防は基準洪水の水位より上に最低3フィートのフリーボードを確保しなくてはならない」と規定されている。なお、同(ii)に次のとおり例外規定が置かれている「(b)(1)(i)に定める河川堤防の最小フリーボード要件については場合により例外が認められる。(中略) どのような場合にも2フィート未満のフリーボードは認められない」。

局各位に心から御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Davis D., Faber B., Stedinger J., “USACE Experience in Implementing Risk Analysis for Flood Damage Reduction Projects”, JOURNAL OF CONTEMPORARY WATER RESEARCH & EDUCATION, 140, pp.3-14, 2008.
- 2) USACE Hydrologic Engineering Center, “PROCEEDINGS OF A Hydrology & Hydraulics Workshop on Riverine Levee Freeboard”, USACE Hydrologic Engineering Center, pp. 231-249, pp.251-260, 1991.
- 3) 小田隆裕、柏木博、巽孝之、能登路雅子、松尾弑之、吉見俊哉編集：事典現代のアメリカ、大修館書店、pp.288、pp.306、2004.
- 4) USACE, “RISK-BASED ANALYSIS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING FOR SUPPORT OF PLANNING STUDIES”, ETL1110-2-556, USACE, pp.B-41, 1999.

板垣 修*



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部水
資源研究室 主任研究官
Osamu ITAGAKI

吉谷純一**



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部流
域管理研究官、工博
Dr. Jun-ichi YOSHITANI