

自然災害による公共土木施設等の実用的な被災リスク

評価手法の開発に向けた取り組み

～洪水と地震・津波～

危機管理技術研究センター長

寺田 秀樹

自然災害による公共土木施設等の実用的な被災リスク評価手法の開発 に向けた取り組み ～洪水と地震・津波～

危機管理技術研究センター長
寺田 秀樹

1. はじめに

平成 21 年に限っても、7月の中国・九州北部豪雨、8月の駿河湾を震源とする地震や8月の台風9号による水害が発生するなど、毎年のように地震や豪雨による大きな被害が発生してきており、災害に強い安全安心な国土の継続的な整備が重要な課題とされている。しかしながら、厳しい財政状況下においては、効率的・効果的な防災対策の実施が不可欠であり、こうした防災事業を進める上で、個々の公共土木施設の被災の可能性や被災した場合の影響度を適切に評価していくことが求められている。

本文では、防災事業の効率化に資することを目的とし、洪水と地震・津波災害を対象として、個々の公共土木施設の被災リスクの評価手法と被災リスクに基づく防災事業の合理化の支援方策に関する研究開発成果について報告する。

2. 研究開発への取り組み

本研究は、国土技術政策総合研究所のプロジェクト研究「地域被害推定と防災事業への活用に関する研究」の一環として平成 18～20 年度に実施したものである。危機管理技術研究センター長がプロジェクトリーダーをつとめ、危機管理技術研究センター砂防研究室・水害研究室・地震防災研究室、河川研究部海岸研究室、沿岸海洋研究部沿岸防災研究室による共同の研究課題として実施した。

防災事業を進める上では、個々の管理施設・地点の被災の可能性とその影響度の評価が不可欠であるが、災害種別・施設種別に見ると、手法自体がない、あるいは、従来手法では適用範囲、精度の面で十分ではないものもある。そこで、本プロジェクト研究では、土砂災害、水害、地震災害、津波災害の4つの自然災害を対象とし、個々の施設や地点の被災リスクを評価する手法の高度化を図ることにより、効率的な対策の実施や発災時の緊急対応の効率化に資することを目標としたものである。本研究では、対象とした4つの災害分野に対して、①施設または地点ごとの被災リスクの評価手法の高度化、②被災リスクに基づく防災事業の合理化の支援方策の提案、の2点を研究目的とした。

研究目的に対応する具体的な研究開発項目として、それぞれの災害分野における現状の技術レベルに応じて本プロジェクトで解決すべき研究課題を以下のように設定した。特に、被災リスクの評価の中で、従来の評価手法が十分ではなかった地震と津波の双方の影響を考慮した複合災害を考慮するとともに、災害後の対応能力の向上や避難支援といった災害時対応分野についての検討も実施した。

(1) 施設または地点ごとの被災リスク評価手法の高度化

- 1) 土砂災害：住民の避難による効果や被災確率を考慮した土砂災害リスク評価手法の検討
 - 2) 水 害：データ整備が不十分な中小河川に対する治水安全度評価手法の検討
水害による直接被害及び間接被害の被害額算定手法の検討
 - 3) 地震・津波複合災害：地震及びこれに続く津波により、河川施設、道路施設、海岸施設、港湾施設等に生じる被害想定手法の検討
- (2) 被災リスクに基づく防災事業の合理化の支援方策の提案
- 1) 地震・津波複合災害：地震・津波被害想定結果に基づく被害軽減対策の検討
 - 2) 災害時対応：地震災害時の対応の支援方策として、実践的な地震防災訓練の実施による震後対応能力の向上策の検討
高潮・津波に対する避難意志決定要因の解明及び避難促進施策の進め方の検討

本文では、上記の研究成果のうち、洪水に対する被災リスクの評価手法として中小河川に対する治水安全度評価手法を、また、地震津波災害に対する被災リスクの評価手法として、地震及びこれに続く津波により施設に生じる被害想定手法を報告する。

3. 洪水に対する被災リスクの評価手法の開発

3. 1 はじめに

近年、集中豪雨等により全国各地で甚大な災害が発生している。とりわけ、局所的な豪雨の影響を受けやすい中小河川においては甚大な被害が発生している。

その一方で、財政面の厳しい制約もあり、効果的な水害対策を図るためにはより優先度の高い地域から治水対策を進めていくことが重要である。また、河川管理者、地域の防災対策を担う関係自治体、さらには地域住民が一体となり、効率的・効果的な治水対策を推進し、災害発生時における実効的な危機管理を実現するためには、河川の各区間における安全度を評価し、その結果を地域にわかりやすく示すことも重要である。

しかしながら、都道府県等が管理する中小河川では、河道横断測量、水位・流量観測等が十分に実施されておらず流下能力などの基本的かつ重要な情報が不足している箇所もあるのが現状である。

以上のような背景から水害研究室では、全国同一の尺度による簡便な治水安全度評価手法を立案し、地方整備局等と連携し一級水系の指定区間等の中小河川を対象として、治水安全度評価を実施し、国管理区間を含む水系全体の治水安全度（その河道区間が安全に流せる洪水の規模）の公表を行った。

なお、国が管理するような重要度の高い河川では、定期的に河道の縦横断測量、水位・流量観測等が実施されており、精度の高い治水安全度評価がすでに行われている。このため、国の管理区間（約 10,000km）については既存の治水安全度評価を使用することとした（図-3.1 参照）。

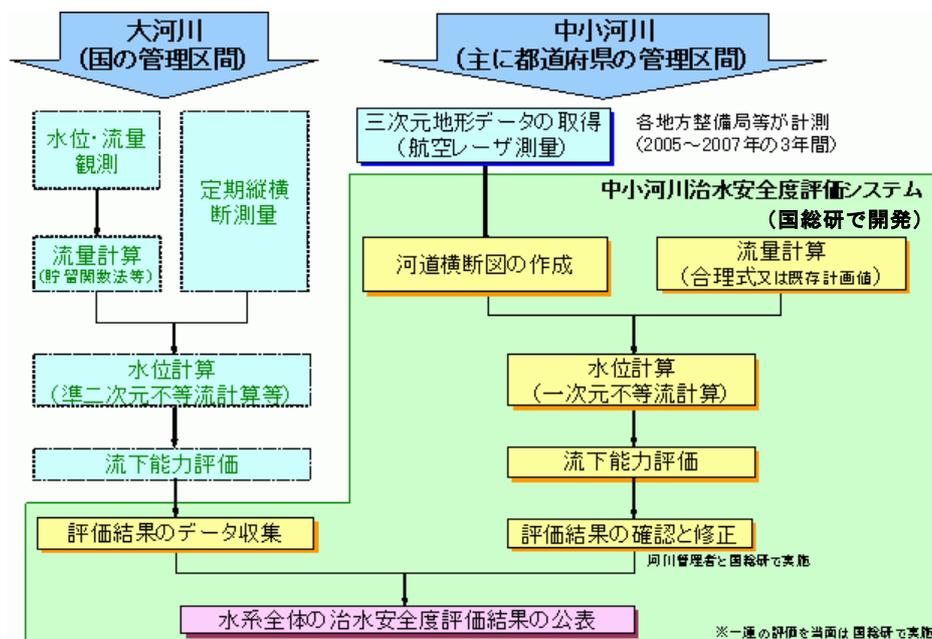


図-3.1 一級水系の治水安全度調査・評価・公表フロー

3. 2 中小河川に対する治水安全度評価手法

中小河川では河道縦横断測量、水位・流量観測等が十分に行われていない区間も多く、基本的情報が不足しているのが現状である。このため、今回の評価においては航空レーザ測量により全国一級水系の中小河川の地形データを取得し基礎データとして使用した。

以下、河川の治水安全度評価の具体的方法を述べる。

(1) 河道地形データの作成

(a) 航空レーザ測量によるデータの取得

国の管理区間以外の中小河川においては、整備計画の検討が行われている等の限られた区間においてのみ河道測量成果が存在し、多くの区間においては河道横断測量成果を有していないことが実状である。こうした測量“空白区”を速やかに解消するため、広範囲の地形データを高密度で取得できる航空レーザ測量（以下、L P測量）を活用した¹⁾。

L P測量は、**図-3.2**に示すとおり、航空機に搭載した航空レーザスキャナから地上に向けてレーザパルスを発射し、反射して戻ってきたレーザパルスを解析することで地形データを取得する技術である。地形データから河道横断形状や氾濫原の地形形状などを得ることが可能である。

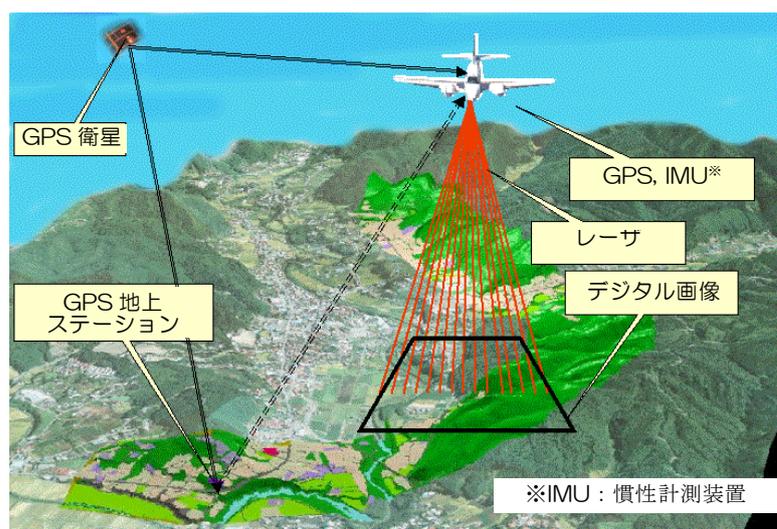


図-3.2 L P測量の概念²⁾

今回は、「航空レーザ測量による河道及び流域の三次元電子地図作成指針（案）平成17年6月 国土交通省河川局」に従い、レーザ計測密度について2mピッチを最低条件として行っている。

(b) 地盤高データの作成（データ処理）

上記にて取得した、L P測量結果である生データにはノイズデータとよばれる空中の雲や塵などに反射したデータも含まれている。このノイズデータを除去し、地表面データ（オリジナルデータ）を作成する。このオリジナルデータは構造物や草本群落の標高値も含むため治水安全度評価に用いる河道断面を作成するための地盤高データを得るには、構造物

や植生群落を除去し地盤高データ（グラウンドデータ）を作成する必要がある。この過程をフィルタリング処理²⁾と呼ぶ。

計測範囲の全域を対象に地表面データをコンピュータプログラムによるフィルタリング処理（自動フィルタリング）を行い、構造物や大きな植生群落等を取り除く。

ただし、自動フィルタリング処理だけでは河川周辺にある除去対象物の取り除きの過不足（橋梁や樹木の取り残し、堤防の消失など）があるため、自動フィルタリング処理後のデータと航空写真（オルソフォト）を見比べ手作業による補正（手動フィルタリング）を行い、流下能力計算に必要な地盤高データを作成する。

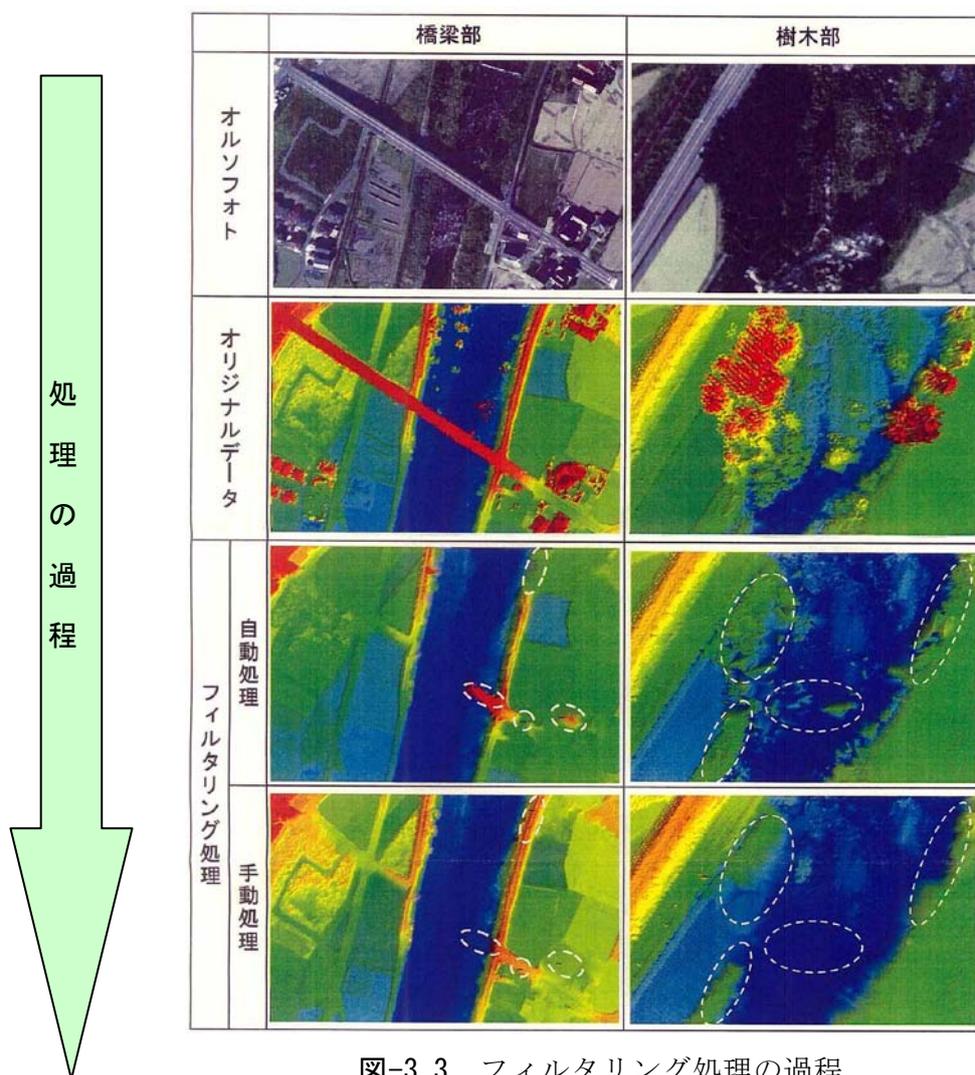


図-3.3 フィルタリング処理の過程
（河道内樹木と橋梁データの除去）

(c) 河道横断形状の作成

地盤高データから河道横断形状を作成する手法としては、主なものに投影法、バッファ一法、TIN（不整三角形網 Triangulated Irregular Network）法があるが、今回は機械的に河道横断図を作成できる TIN 法を採用し、河道中心線に直交する任意の横断測線上の標高を、

地盤高データから作成された三角形網より自動的に河道横断形状を得るシステムを開発し治水安全度評価に使用した。

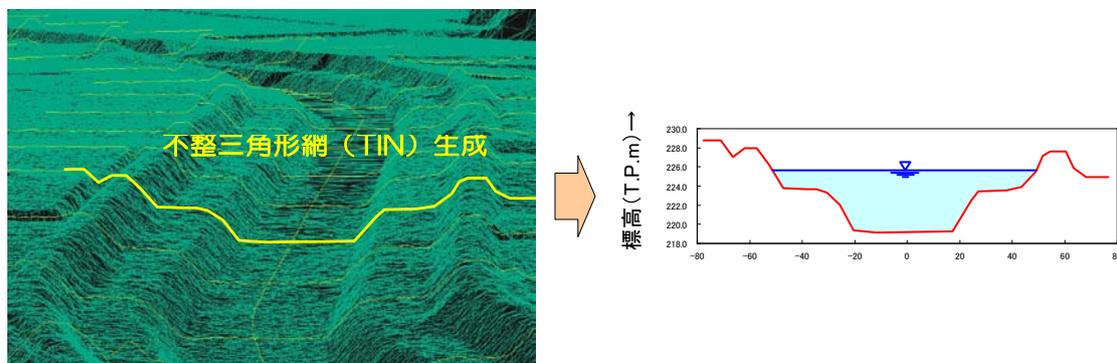


図-3.4 TINによる河道横断面作成

(d) 地盤・地形データの精度を向上させるための配慮

河道横断面取得においては、LP測量自体の誤差³⁾(計測機器や計測実施条件等に左右されるが、概ね水平精度±30cm、鉛直精度±15cm)、TINデータからの内挿補間による誤差の影響の他に、レーザの性質上、水面下の地形データを計測できないこと、草本類の影響を受けるため実際の地盤高よりやや高い地盤高で計測され、通常の河道横断面測量結果と比較するとやや横断面積が小さくなる傾向が見られた(図-3.5、図-3.6 参照)。

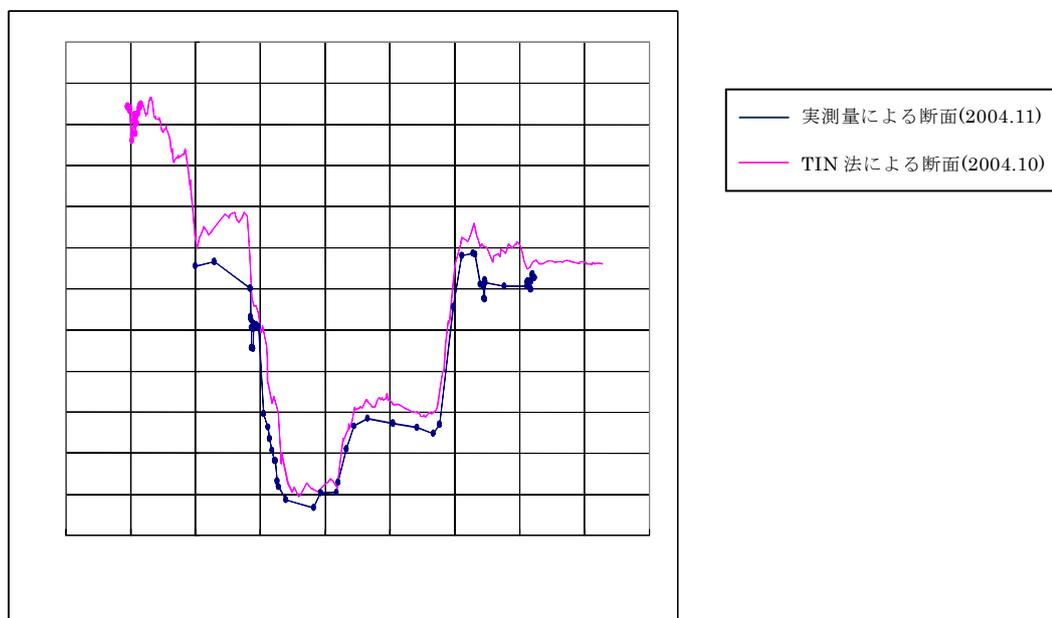


図-3.5 LP計測による断面と実測による横断面

これらの誤差をできるだけ小さくするために、河道横断面測量が実施されている場合は、その測量断面を用いて精度チェックや補正・補完を行った。

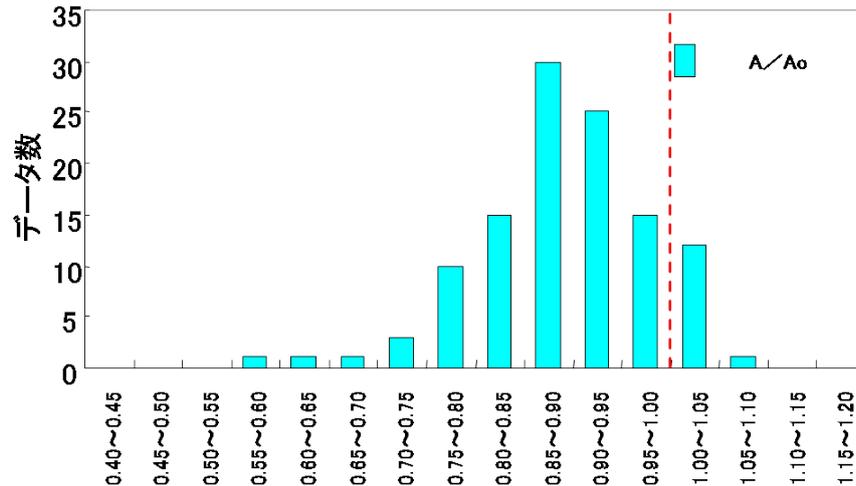


図-3.6 実測断面に対するLP測量による断面の比

(A:LP測量による断面積 A₀:実測による断面積)

(2) 流量および水位計算の方法

(a) 基本的な考え方

中小河川においては前述のように、水位・流量観測等が十分に実施されていないこともあり、今回の評価にあたっては全国各雨量観測地点の降雨強度式と合理式による確率規模別流量の計算及び一次元不等流計算といった簡便な解析手法を採用した。

(b) 降雨強度 r

降雨強度式にはフェア式を用いる。実際の計算では独立行政法人土木研究所が開発した「アメダス確率降雨計算プログラム」を使用する。

(<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/amedas/top.htm>)

$$r_t^T = \frac{bT^m}{(t+a)^n} \quad (3.1)$$

ここで、各変数は以下の通りである。

r_t^T : 確率年 T の t 継続時間確率降雨強度 (mm/hr)、

T : 確率年(年)

t : 降雨継続時間 (hr)

a, b, m, n : フェア式パラメータ

このプログラムは、全国の気象庁アメダス観測点の約 1,300 地点のうち 748 地点について、1971 年～2000 年までの雨量データを基に作成したものである。なお、 t にはクラーヘン式によってもとめた合理式における洪水到達時間を与える。

(c) 合理式と流出係数 f

合理式で用いる流出係数 f は、土地利用区分ごとの流出係数の加重平均（各区分の面積

に関する)とし、「河川砂防技術基準⁴⁾」を参考に山地を 0.7、平地を 0.8 と設定した。なお、計算に必要となる流域面積や流路長といったデータは河川現況台帳をもとに国総研水害研究室が整理し、放水路の新規建設等により修正が必要であると判断される場合には修正を行った。

$$Q_p = \frac{1}{3.6} frA \quad (3.2)$$

ここで、各変数は以下の通りである。

Q_p : 洪水ピーク流量 (m³/s)、

f : 流出係数

r : 洪水到達時間内の降雨強度 (mm/hr)

A : 流域面積 (km²)

(d) 一次元不等流計算と粗度係数 n

河床材料や河道内樹木群等の河道特性を反映できる水位計算手法も実用化されているが、河道特性を把握することは容易ではない。そのため、河道横断面に合成粗度係数を設定し一次元不等流計算により、水位計算を行った。ただし、中小河川には急勾配区間も多いので、必要に応じ、常流射流混在の計算もできるようにしている。

この場合において、河道の全ての特性（河床材料、河道横断面形状など）を考慮した合成粗度係数の与え方が大切になる。今回の検討では中小規模でも粗度係数が実測値等から詳細に検討されている 58 河川を対象にした場合、平均的な合成粗度係数として $n=0.033$ が得られたことから、国総研が行った一次評価においては、すべての区間においてこの値を一律に設定し、水位計算を行った。

(3) 治水安全度の評価

(1) (c)で作成した河道横断形状から堤防の評価高（今回の検討では堤防の評価高については、「評価高＝現況天端高－確率規模別流量に応じた余裕高」を基本としているが、背後地盤高の方が高い場合は、評価高を背後地盤高として採用している。）を決定し、(2)で得た水位計算結果と比較することによって、治水安全度を評価する。

T=30 の洪水の水位計算結果と評価高を比較し、堤防の評価高が水位を上回る場合、青色で着色し、「30年に一度発生すると想定される降雨に対応している区間」とした。また、評価高がT=10の洪水の水位計算結果を下回る場合は、「10年に一度発生すると想定される降雨に未対応の区間」として赤色で着色し、そのどちらでもない場合は、黄色に着色し、「10年から30年に一度発生すると想定される降雨に対応している区間」とした。(図-3.7参照)。

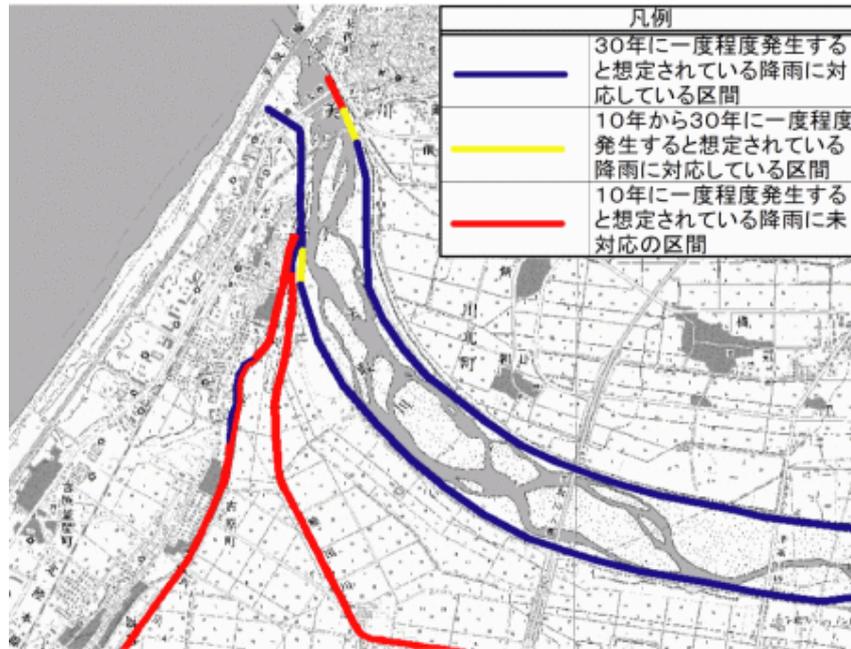


図-3.7 中小河川治水安全度評価イメージ

また安全度評価は 100m ピッチで実施しているが、表示にあたってはLPデータの精度や評価結果の見やすさを考慮して 500m 毎にその区間における最も低い安全度の表示を基本とした。

(4) 評価結果の公表

2009年8月現在、全国109水系の内71水系(表-3.1、延長約12,800km)の治水安全度評価結果を公表している。その他の水系についても各河川管理者において、現在評価結果の妥当性を確認しており、確認作業終了の後、順次公表を進める。なお、要整備区間がないなどの理由で評価作業を実施しておらず、公表予定のない水系もある。

表-3.1 公表済み水系(網掛けしている水系が公表済み)

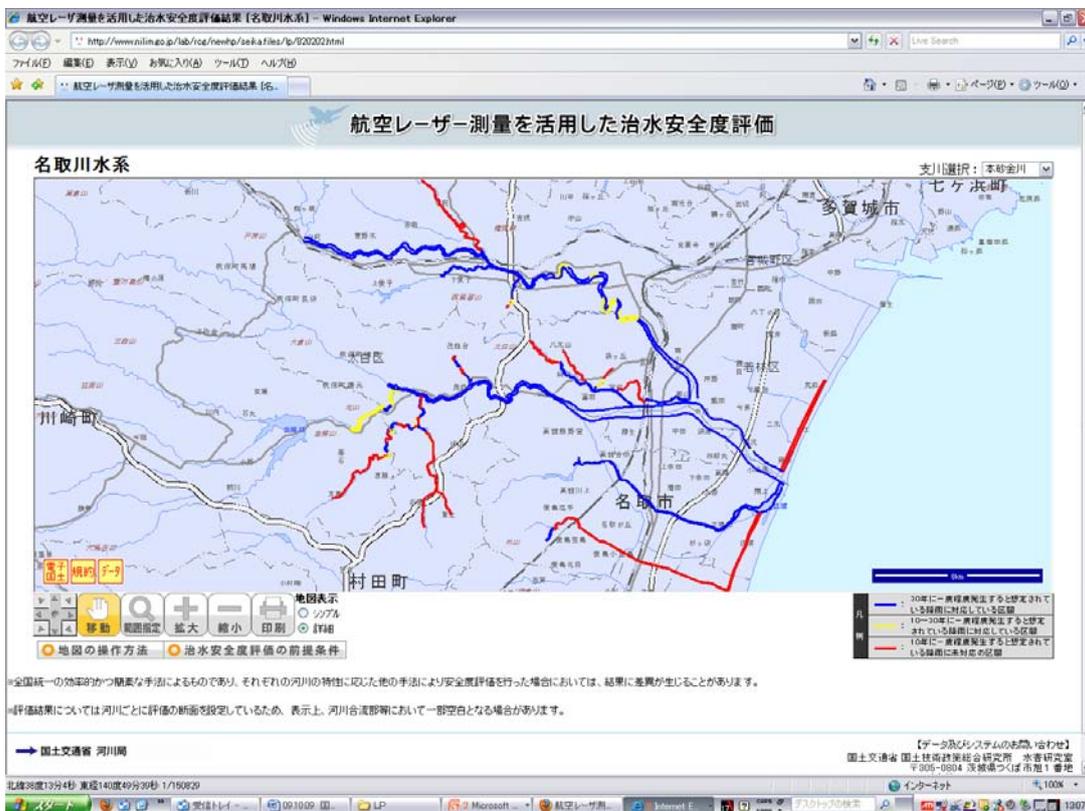
| | | | | | | | | | | |
|-------|------|-----|------|------|-----|------|-----|-----|-----|------|
| 天塩川 | 常呂川 | 米代川 | 鶴見川 | 神通川 | 豊川 | 大和川 | 日野川 | 吉井川 | 松浦川 | 川内川 |
| 留萌川 | 湧別川 | 雄物川 | 相模川 | 庄川 | 矢作川 | 淀川 | 斐伊川 | 重信川 | 本明川 | 肝属川 |
| 石狩川 | 渚滑川 | 子吉川 | 富士川 | 小矢部川 | 庄内川 | 加古川 | 江の川 | 肱川 | 六角川 | 大淀川 |
| 尻別川 | 阿武隈川 | 最上川 | 荒川 | 手取川 | 木曾川 | 揖保川 | 高津川 | 渡川 | 嘉瀬川 | 小丸川 |
| 後志利別川 | 名取川 | 赤川 | 阿賀野川 | 梯川 | 鈴鹿川 | 九頭竜川 | 佐波川 | 仁淀川 | 筑後川 | 五ヶ瀬川 |
| 鶴川 | 鳴瀬川 | 久慈川 | 信濃川 | 狩野川 | 雲出川 | 北川 | 小瀬川 | 物部川 | 矢部川 | 番匠川 |
| 沙流川 | 北上川 | 那珂川 | 関川 | 安倍川 | 櫛田川 | 由良川 | 太田川 | 那賀川 | 菊池川 | 大野川 |
| 十勝川 | 馬淵川 | 利根川 | 姫川 | 大井川 | 宮川 | 円山川 | 芦田川 | 吉野川 | 白川 | 大分川 |
| 釧路川 | 高瀬川 | 荒川 | 黒部川 | 菊川 | 新宮川 | 千代川 | 高梁川 | 土器川 | 緑川 | 山国川 |
| 網走川 | 岩木川 | 多摩川 | 常願寺川 | 天竜川 | 紀の川 | 天神川 | 旭川 | 遠賀川 | 球磨川 | |

公表結果は国総研水害研究室の web ページで閲覧できる。

トップページ(<http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/seika.files/lp/eva.html>)にある「治水安全度評価」のタブから地方・水系を選択した後に目的の水系の評価結果を見ることができるようになっている(図-3.8)。なお、背景地図には国土地理院が公開している電子国土を用いている。



(a) 公表サイトのトップページ



(b) トップページで治水安全度をクリックした後の公表結果のページ例

図-3.8 治水安全度評価公表サイト

4. 地震・津波災害に対する被災リスク評価手法の開発

4. 1 被害想定手法の開発

4. 1. 1 はじめに

地震・津波被害の軽減には、被害想定を実施し、その結果に基づいて対策計画を立案・実行することが有効である。そのため、中央防災会議や地方自治体でも、今後発生が予想される大規模地震に対する被害想定が実施されている。被害想定が実施されている地震は内陸直下の地震と海溝型の地震とに分けられるが、海溝型の浅い地震は、強い揺れの後に津波が来襲する特徴がある。上記の被害想定では、これら揺れと津波に対して建物被害や人的被害を想定しているが、被害を防ぐ、または緊急輸送を担うための施設である公共土木施設の被害を想定する手法については、参考となる指針が存在しなかった。そこで、被害を想定すべき施設、被害の想定手法を検討し、一部施設の被害想定については参照すべき基準書を示し、評価手法の詳細は基準書などに従うこととしたうえで、公共土木施設（ここでは海岸・港湾・河川・道路施設を対象）の被災を考慮した地震・津波被害の想定手法をとりまとめた（図-4.1）。施設ごとの被害想定手法の概要は以下に示すとおりである。なお、この結果は文献⁵⁾にマニュアル（案）として公表されている。

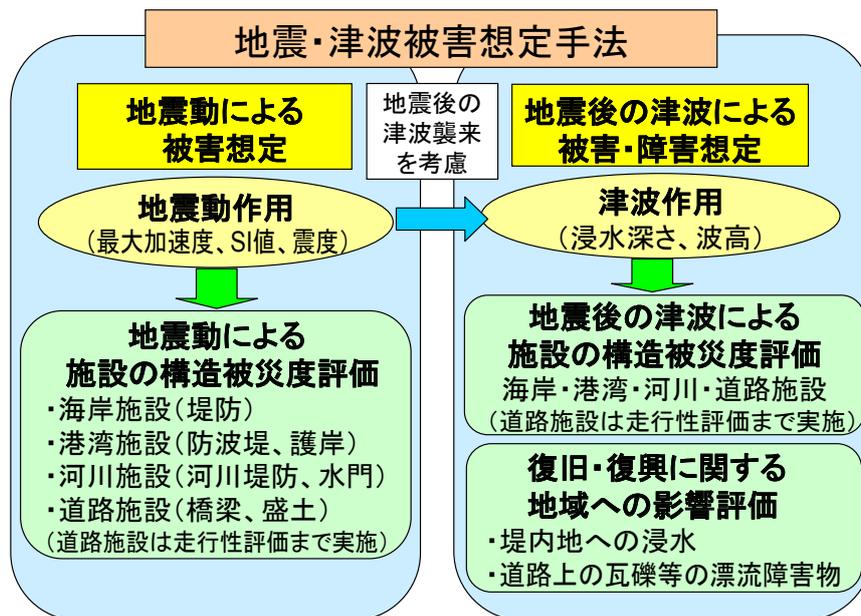


図-4.1 公共土木施設の地震・津波被害想定手法の概要

4. 1. 2 海岸施設

海岸施設の被害想定で対象とする項目は、地震動及び津波による施設機能の低下であり、浸水防止機能を有する海岸施設の代表的なものである海岸堤防を対象とした（表-4.1）。

表-4.1 被災リスク評価の対象施設と評価手法の概要（海岸施設）

| 対象施設等 | 評価手法の概要 |
|-------|---|
| 海岸堤防 | 地震：動的・静的 FEM 解析により変形を評価 津波（倒壊）：波圧と土圧を算定し堤体の安定性を照査 津波（洗掘）：越流量等から洗掘量を推定 津波（被覆工の流出）：越流に対する被覆工の必要質量を照査 |

海岸施設は、海岸堤防が海岸背後の人命・資産を高潮、津波及び波浪から防護するなど、浸水を防止する機能を有している。地震動による海岸堤防の沈下は、津波による背後地の被害を増大させる可能性があり、機能低下の典型例である。よって、想定地震のもとで所要の機能を確保できる耐震性能を照査することとする。津波による海水の侵入を防止する機能に着目すると、天端高の維持に関わる沈下を照査する必要がある。

被害想定において対象とする地震動は、「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」⁶⁾に従って、通常の施設については、施設の供用期間中に1～2度発生する確率を有する地震動（レベル1地震動）、背後地の重要性等により高い耐震性能が必要とされる海岸施設については、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動（レベル2地震動）とする。また、各施設の構造特性に応じた適切な耐震解析法に基づいて耐震性能を照査することとするが、構造物の変形状況をより精緻に予測できる動的 FEM 解析(例えば FLIP)や静的 FEM 解析(例えば ALID)を用いることが望ましい。

一方、一般的に地震後の津波は数波に渡り、後続の波が第一波より高いこともある。このため、津波による海岸施設の被災は、海岸施設の浸水防止機能を低下させ、その後に来襲する津波による背後地の被害を増大させる可能性がある。よって、想定津波に対する施設の安全性能を照査する必要がある。

1983年日本海中部地震(M7.7)および1994年北海道南西沖地震(M7.8)の被災事例を整理すると、津波による海岸堤防の被災形態は、①堤体・上部工の倒壊、②堤体基礎洗掘、③被覆工の流出に分類される。

①は、**図-4.1**のように津波の波力が堤体・上部工に作用することにより、堤体の転倒・滑動や上部工の亀裂・倒壊が生じるものである。これについては、堤体に作用する波圧と土圧を算定し、堤体の安定性を照査することができる。なお、津波の波圧・波力の算定式は多数提案されているが、構造物の位置、ソリトン分裂の有無などを考慮して適切な算定式を選択する必要がある。たとえば、孤立波を作用させた水路実験（**写真-4.1**）では、**図-4.2**のように、砕波しながら孤立波が堤防模型に作用する場合に、静水面（ $z/H=0$ ）よりやや上方において既存の算定式を上回る波圧が測定されている⁷⁾。

②は、**図-4.3**のように越流により構造物近傍の地盤が洗掘されるものであり、波力の増大などを通じて①や③に繋がる可能性がある。局所的な現象である洗掘を推定するには津波の流動を詳細に想定する必要があるが、越流量などから洗掘量を推定する方法⁸⁾もある。

③は、地震動により被覆工の目地が開くことなどにより、越流により被覆工が流出するものである。その照査には、越流に対する被覆工の必要質量を求めるイスバッシュの式⁹⁾

など、被覆工の位置や形状等に応じて適切な算定方法を採用する必要がある。

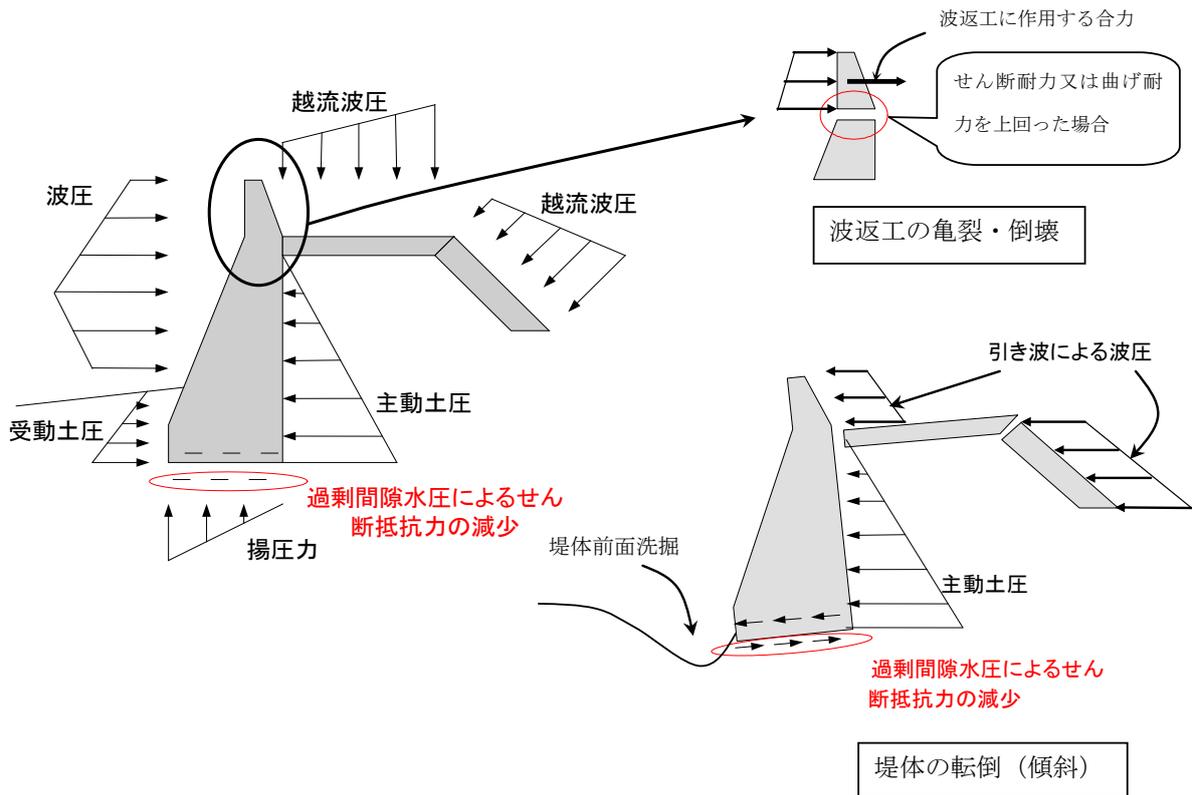


図-4.1 海岸堤防に作用する荷重

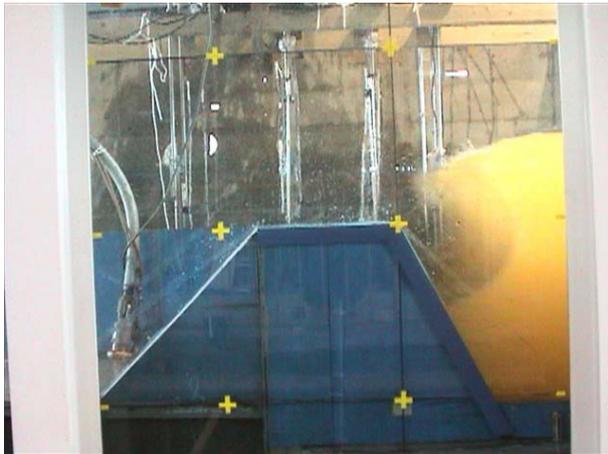


写真-4.1 砕波しながら堤防に衝突する孤立波

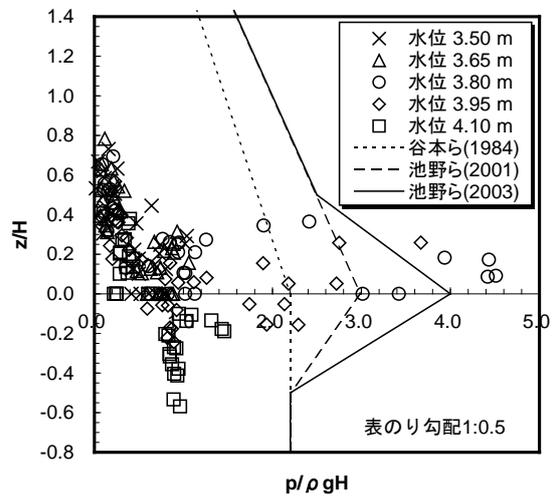


図-4.2 波圧の鉛直分布
(表のり勾配 1:0.5)

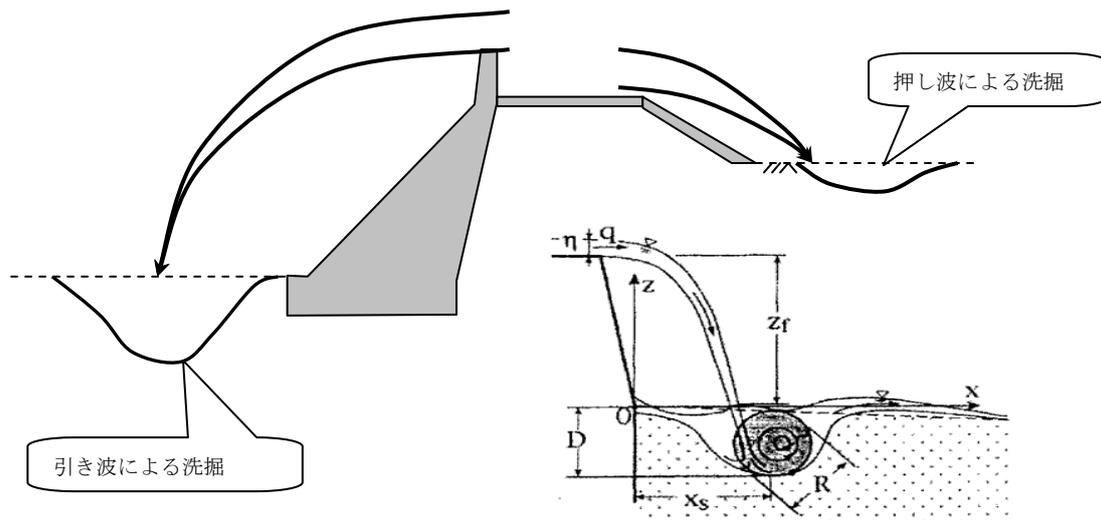


図-4.3 津波による構造物周辺の洗掘

4. 1. 3 港湾施設

地震、津波による港湾施設の被害想定に関するこれまでの研究成果をレビューし、地震に対する被害想定手法、津波に対する被害想定手法に分けてそれぞれ体系化を図った。地震に対する被害想定手法については、これまでの関連研究がかなり進んでいることもあり、まとまった形での体系化がほぼ確立された形になっているが、津波に対する被害想定手法については、関連研究が途上のものも多く、必ずしも完全な形での体系化が実現できた段階にあるわけではない。そのため、津波波力に対する防波堤の安定、被覆石の散乱、消波工の移動・散乱、護岸の変形については類似の研究成果を津波の場合に適用する形で被害想定手法とみなすこととしている。また、近年、津波漂流物に関する被害想定手法についての研究が各方面において精力的に行われてきており、本分野について最新の研究成果を踏まえたものを取りまとめた（表-4.2）。

以下、被害想定の対象とする項目を4つ設定し、各項目について説明する。

表-4.2 被災リスク評価の対象施設と評価手法の概要（港湾施設）

| 対象施設等 | 評価手法の概要 |
|-------|--|
| 防波堤 | 津波波圧を評価し滑動・転倒・支持力不足について検討 |
| 護岸 | 時刻歴応答解析により変形量を評価 |
| 漂流物 | 津波数値シミュレーション及び個別要素法による漂流物の形状表現・衝突評価を組み合わせる評価 |

※地震による被災評価は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁹⁾に従う

(1) 港湾施設の地震動による被害

港湾施設の地震動による被害は、2007年に改正された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁹⁾に従って想定することとする。地震動による港湾施設の被害予測手法については、静的解析手法（震度法、応答変位法等）、動的解析手法（応答スペクトル法、時刻歴応答解

析法)に分類できる。本研究では、各種港湾施設に対して、これらの地震被害予測手法の適用性を検討し、その結果、震度法については重力式構造物、矢板式構造物、盛土に適用可能であり、保有水平耐力法については直杭式棧橋に適用可能であることが分かった。こうした結果を、実際の被害想定に用いる際の参考とすることが望まれる。

(2) 地震動・津波による防波堤の被災

地震動については、設置水深が深く設計波高が小さい場合に、波浪に関する変動状態において定まる堤体の断面諸元とレベル1地震動の関係より耐震性能照査の必要性を判断し、必要性ありと判断された場合、耐震性能照査を行うこととしている。なお、滑動・転倒に関して照査が必要とされた場合の性能照査方法は、港湾基準にもとづき行う。

津波による防波堤の被災は、波浪を対象とする変状と近似していると考え、津波による被災として特に問題となるものについての被害想定手法を以下の1)~3)のように評価した。

1) 防波堤の津波に対する安定

滑動による堤体の変位・転倒による堤体の変位・マウンド支持力不足による堤体の変位についての検討は、既存の成果である谷本らの津波波圧式を用いる。

2) 防波堤の被覆石の散乱

本検討では、流れに対する被覆材の安定質量のイスバッシュの式により、使用被覆石の重量が安定質量以下の場合、散乱が発生すると考えられる。

3) 防波堤の消波工の移動・散乱

消波工の散乱については、津波に対する評価式が存在しないため、ソリトン分裂津波による異型ブロック堤に関する散乱実験結果¹⁰⁾を参考にするのが望ましい。これによれば、津波による破壊力は従来の波浪によるものと比べて格段に大きく、消波ブロックの移動・散乱が生じる危険性があることが示唆されている。

(3) 地震動・津波による護岸の変形

護岸の傾斜をはじめとする構造物の変形量について、定量的な照査を行うためには、時刻歴応答解析法を用いる必要がある。時刻歴応答解析手法は、有効応力解析法と全応力解析法に分類することができ、解析プログラムがそれぞれについて存在する。これらを地震時の過剰間隙水圧の発生程度等に応じて使い分ける必要がある。なお、全応力解析法は、その地点の土被り圧等の応力に比べて過剰間隙水圧が無視できる程度の場合に適用されるのが通常である。

津波による護岸の被害は、波力による被害、前面洗掘の被害、背面洗掘の被害に分類できる。このうち、背面洗掘の被害については、護岸背後地盤洗掘の検討、津波戻り流れによる抗力を作用荷重とするケーソン壁体上部工の安定に関する検討結果¹¹⁾が参考になる。

(4) 漂流物の評価

港湾に津波が来襲した際の漂流物の挙動を適切に再現できる漂流シミュレーション手法を用いて漂流域の推定を行う。漂流物の外力としては、平面2次元津波解析結果を用い、漂流物に関する運動方程式を解くことにより、漂流物の挙動を計算することができる。

また、漂流物の衝突力を算定する方法には、木材を対象漂流物とする松富らの研究¹²⁾や、コンテナを対象とする水谷らの研究¹³⁾など、様々な既往研究が存在する。国総研では、

平面二次元津波数値シミュレーション及び個別要素法による漂流物の形状表現・衝突評価を組み合わせた解析法を提案している（図-4.4）¹⁴⁾。

実際に構造物の安全性照査を行う際には、これら各種算定手法について試算した結果等から、平均的な値を示す算定方法を採用する等、適宜判断する必要がある。

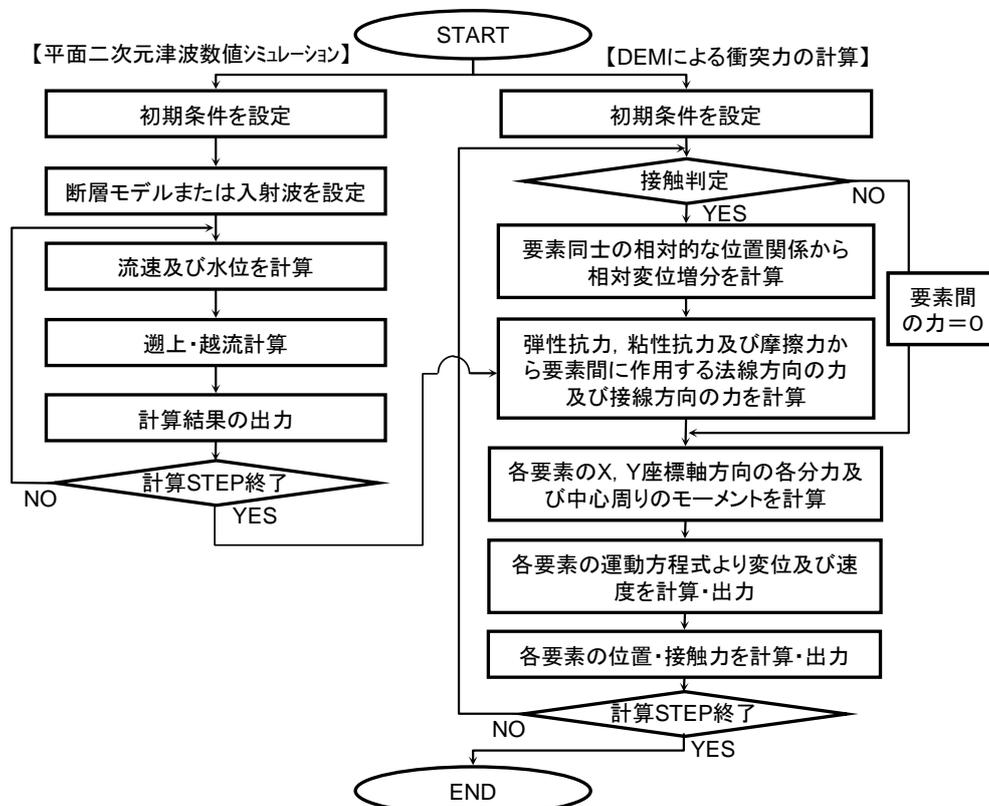


図-4.4 漂流物計算過程を示すフロー

4. 1. 4 河川施設

液状化に伴う河川堤防の沈下量評価及び、堰、水門、樋門、樋管などの河川管理施設の地震動による被災評価については「河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説」¹⁵⁾の方法に則って検討することを基本とする。また、津波による被災評価については以下のような検討を行った（表-4.3）。

表-4.3 被災リスク評価の対象施設と評価手法の概要（河川施設）

| 対象施設等 | 評価手法の概要 |
|---------------|---|
| 水門、樋門等 | 津波波力を算定 ¹⁶⁾ し応力照査 |
| 越流区間 | (液状化による沈下後の堤防天端高) < (津波時の河道内の水位) となる区間を評価 |
| 津波が堤内地に逆流する施設 | 津波の到達時間や、閉操作完了までの所要時間、遠隔操作の有無等を整理して評価 |
| 堤内地の浸水 | 津波の河川遡上シミュレーションにより評価 |

※地震による被災評価は「河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説」¹⁵⁾に従う

(1) 津波による水門、樋門等のゲート部損傷

一般的に水門や樋門は上流からの水圧に耐えられるように設計されており、下流側からの水圧については検討されていない。水門や樋門等の河川構造物は津波の進行方向と平行にゲートが設置されているが、河道の湾曲や河川敷の状況などに応じて斜めから津波を受けることが考えられる。よってこれら施設も応力照査の実施対象とすることが望ましい。

津波波力の算定方法は「アルミニウム合金製水門設計製作指針案」¹⁶⁾等において提案されている。なお、津波の進行方向に対して平行な位置に配置されている水門については、衝撃力が直接作用することは考えにくい、津波の遡上状況や施設の設置状況に応じて斜めに衝突することが想定される。よって安全側(波力が作用する側)を想定して、津波がある角度から衝突するものと考え、衝撃圧を算定することも考えられる。衝突角度は適宜現地の状況等によって設定することが望ましい。

(2) 津波の越流区間

液状化による沈下後の堤防天端高と津波の河川遡上シミュレーションによる河道内の水位を比較し、津波が越流する堤防区間を把握する。津波の河川遡上シミュレーション手法については、「津波河川遡上解析の手引き(案)」¹⁷⁾に示されている手法を基本とする。

(3) 津波が堤内地に逆流する施設(水門、樋門など)の特定

水門、樋門等については地震動による被害が発生しなければ、状況によっては、閉操作を完了させ、堤内地への津波の流入を防ぐことが可能である。津波の河川遡上シミュレーションから得られる各所における津波の到達時間や、閉操作完了までの所要時間、遠隔操作の有無など、表-4.4に示すような項目を一覧表に整理することで、津波が堤内地に流入する施設を把握することが可能である。

表-4.4 整理項目例

| | | |
|----------|---------------|---------|
| ・河川名 | ・種別(樋門、水門など) | ・ゲート構造 |
| ・管体等の大きさ | ・操作状況(委託・遠隔等) | ・敷高 |
| ・背後地地盤高 | ・想定津波高 | ・操作所要時間 |
| ・津波到達時間 | ・操作方針 | |

(4) 津波の河川遡上による堤内地の浸水

津波の河川遡上による堤内地の浸水想定を行う際には、上記の地震動による河川構造物に被害状況、水門・樋門等の閉操作の可否等を考慮して、適切に条件設定を行うことで、シミュレーションの精度を向上させる。シミュレーション手法については、前述の「津波の河川遡上解析の手引き(案)」¹⁷⁾が参考となる。

水門・樋門等の開口部からの水の流入量、河川堤防の越流量については次に示す手法で計算することができる。

①水門・樋門等の開口部からの水の流入量

最小計算格子幅よりも狭く、開口部の高さも限定されているような水門・樋門・樋管からの堤内地への流出入について「氾濫シミュレーション・マニュアル(案)」¹⁸⁾に施設の前

面と背面の水位差を用いて流量を算定する方法が示されており、その他に施設開口部の幅に応じて通過流量を制限するなどの方法が考えられる。いずれの方法を用いる場合においても、施設の開口部の断面積など施設諸元を考慮したモデル化を行う必要がある。また、堤外側にフラップゲートが設置されている施設については、津波来襲時にゲートが自動で閉鎖されるため津波が施設を逆流することはないと考え、モデル化の対象から除外できると考えられる。

②河川堤防の越流量

河道内の水位が堤防天端高を超えた場合、越流状態に応じて堤単位長さ当たりの越流量を本間の公式¹⁹⁾を用いて算出することができる²⁰⁾。

4. 1. 5 道路施設

(1) 道路通行障害の予測手法の検討

道路は地震・津波災害時にも、沿岸部からの避難や救助等の緊急活動、ライフラインの復旧活動等を支える交通基盤として機能することが期待されている。しかしながら、全ての道路施設に直ちに補強等の対策を実施することは困難であるし、道路施設そのものは被災を免れたとしても浸水等により通行障害が発生する場合がある。したがって、これら種々の可能性を考慮した上で、地震発生からどの程度の時間、どの区間に通行障害が生じる可能性があるかを予め把握しておくことが望ましい。

ここでは、地震・津波発生時の道路通行障害の予測に適用可能な手法を整理した²¹⁾。地震・津波時には、種々の要因で道路通行障害が発生する可能性があるが、ここでの対象は、橋梁と盛土の地震動・津波波力による被災、浸水と道路上への漂流物（家屋倒壊による瓦礫、漁船）の影響とした（表-4.5）。このうち、橋梁と盛土の地震動による被災および盛土の津波による被災については、既往の研究で提案されている手法^{22),23),24)}が適用可能であるが、道路橋の津波被災度については実用的な評価手法がないため、模型実験の結果等をもとに新しく提案した。道路の浸水区間は、推定されている最大浸水深が路面高（＝路面の標高－周辺地盤の標高）より大きい区間として評価できる。また、漂流物についても新しく評価手順を検討した。

表-4.5 被災リスク評価の対象施設と評価手法の概要（道路施設）

| 対象施設等 | 評価手法の概要 |
|-------|--|
| 橋梁 | 地震：地震動強さと構造諸元から簡易フロー ²²⁾ に基づき評価 津波：津波高さから構造諸元から簡易フローに基づき評価 |
| 盛土 | 地震：道路防災総点検の評価点数と換算水平震度から沈下量を推定 ²³⁾ 津波：越流水深と盛土高から整理された被災基準 ²⁴⁾ により評価 |
| 浸水区間 | (最大浸水深) > (路面の標高－周辺地盤の標高) の区間として評価 |
| 漂流物 | 最大浸水深と各種統計調査データから手順に基づき評価 |

(2) 道路橋の津波被災度評価

まず水路と橋桁模型（縮尺 1/18）を用いた実験（写真-4.2）を行い、津波を模擬した孤立波が橋桁模型に衝突する際の波力を計測した²⁵⁾。実験で得られた波力の時刻歴は、水平成分、上下成分ともに、波が衝突した直後にかかなり大きい衝撃波力が作用し、その後、ほぼ定常であるが漸減する抗力が作用していた。検討の結果、衝撃波力は波が橋桁模型の付近で砕波するか否かに大きく影響されること、橋桁の流失可能性の評価には津波による道路橋の被災度評価には、水平抗力を考慮する必要があること、水平抗力は港湾基準の式⁹⁾により安全側の評価が可能であること（図-4.5）などが分かった²⁵⁾。

この結果を参考に、図-4.6 に示すような道路橋の津波被災度評価フローを作成した。これは以下のような考えに基づくものである。

- ①橋桁を越流すれば支承が損傷すると評価する。ただし、平成8年以降の道路橋示方書を適用したものについては、兵庫県南部地震相当の地震力を考慮して耐震設計され、相当大きな耐力を有していることから、津波の衝突に対しても十分な耐力を有しているものとする。
- ②支承が損傷する場合、橋桁が流失するか否かの判定を行う。津波衝突時に橋桁に作用する水平抗力（港湾基準の式で評価²⁵⁾）が摩擦力（橋桁の水中重量×摩擦係数）よりも大きい場合、橋桁が流失する可能性があるとして判定する。
- ③橋桁が流失する可能性がある場合、橋軸直角方向変位制限装置あるいは落橋防止構造の有無で被災度を判定する。これは、2004年スマトラ島沖地震による津波の際にバンダアチエ市周辺で見られた、橋桁の橋軸直角方向への移動を防ぐ拘束機構が橋桁の流失を防止した事例²⁶⁾を考慮したものである。

フローにしたがって評価した被災度から、地震被災度評価²²⁾と同様に、図-4.7 に従って道路橋の走行性a, b, cを判定する。ただし、背面土判定シートとして図-4.8 を用いる点が地震とは異なる。走行性の定義は以下の通りである。

- a: 構造的に問題があるため短期間での通行は不可能
- b: 構造的に問題なく1～2日程度の段差修正で通行可
- c: 無補修あるいは軽微な段差補修で通行可



写真-4.2 水路実験において橋桁模型に衝突する孤立波

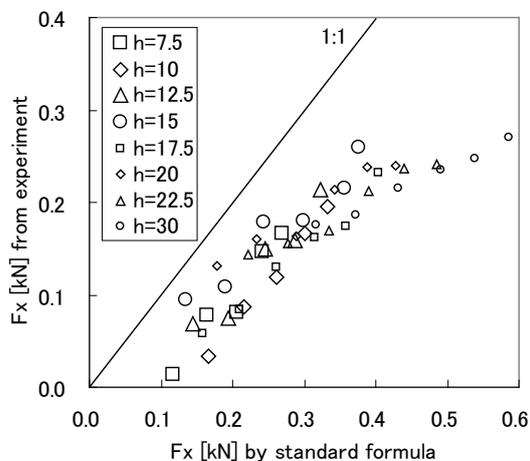


図-4.5 計測された波力と港湾基準式から推定される波力の比較（h は水深[cm]）

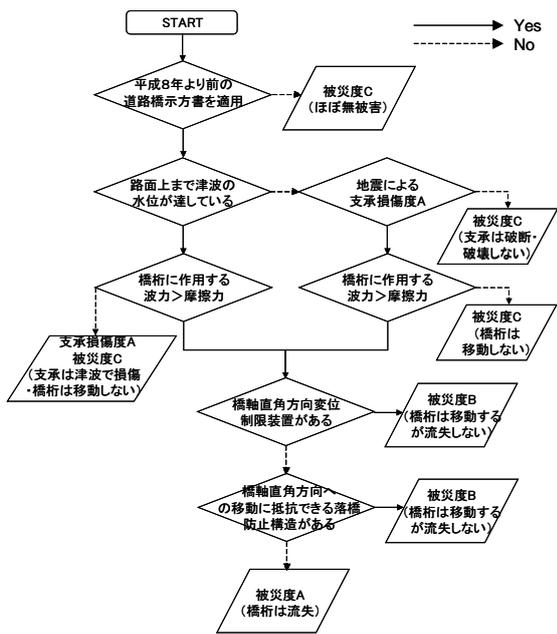


図-4.6 桁橋形式の道路橋の津波被災度評価フロー

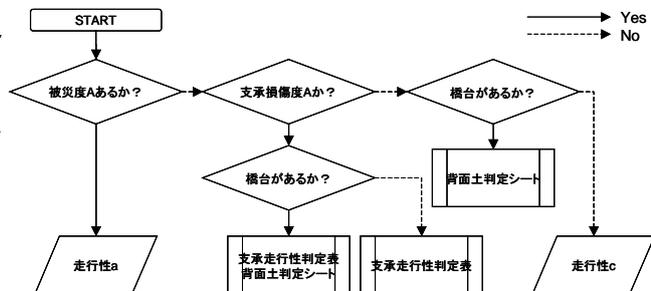


図-4.7 道路橋の走行性の判定フロー²²⁾

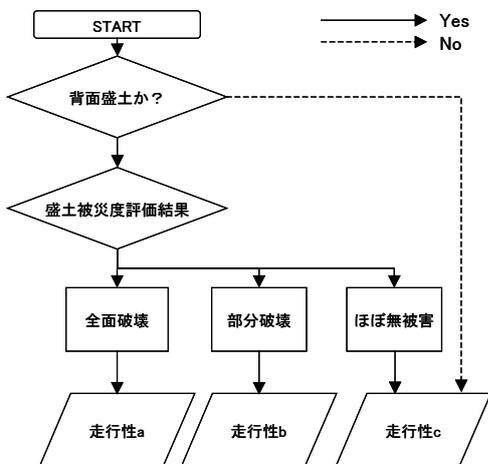


図-4.8 津波走行性判定に用いる背面土判定シート

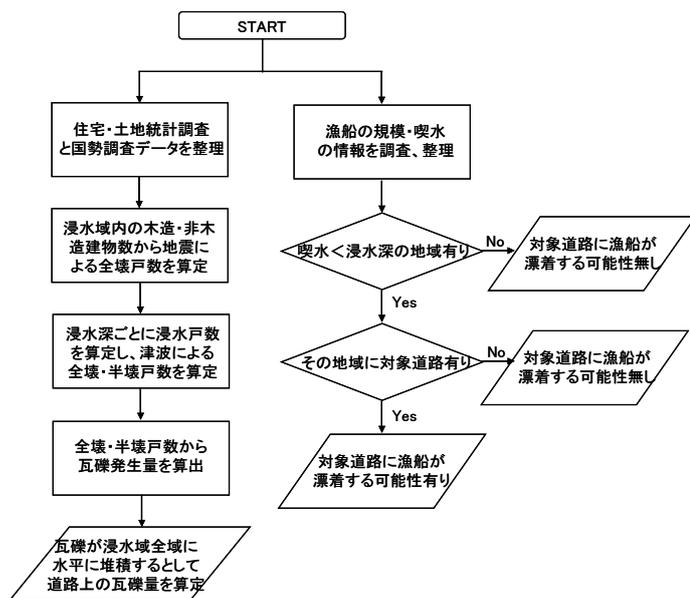


図-4.9 漂流物（家屋倒壊の瓦礫、漁船）の評価フロー

(3) 漂流物の評価

漂流物としては、1993年北海道南西沖地震(M7.8)による津波の被害実態を参考に家屋倒壊による瓦礫と漁船を考慮し、図-4.9のフローで道路上に堆積する瓦礫量と漁船が漂着する可能性を評価することとした。道路上に堆積する瓦礫量は、次の手順で算定する。

- ① 浸水域内の木造・非木造建物数を計測震度ごと、浸水深ごとに算出

- ②計測震度と建物被害率の関係から木造・非木造それぞれの地震による全壊棟数を算出
- ③地震による全壊棟数を除いた木造建物を対象に、津波による全壊・半壊棟数を算出
- ④地震と津波による全壊・半壊棟数を合わせた建物被害棟数と1棟あたり床面積から被害面積を算出し、面積当たり瓦礫重量から瓦礫重量を算出、さらに瓦礫体積に換算
- ⑤発生した瓦礫は浸水域全域に水平に同じ厚さで堆積するとして、道路上の瓦礫量を算定（ただし道路上に堆積する瓦礫の高さはその地点の最大浸水深を上回らない）

漁船の漂着可能性については、漁船の規模と喫水を調査し、喫水よりも浸水深が大きく、対象とする道路が存在する地域では、その道路に漁船が漂着する可能性があるとして評価する。個々の漁船の喫水について情報が得られない場合には、漁船の規模から推定される喫水の最小値を用いる。

4. 2 被害想定例と想定結果の活用方法

4. 2. 1 被害想定の実用例

地震・津波による公共土木施設の被害や浸水域の想定結果を表示した被害想定マップを作成することにより、地域ごとの地理的条件等を考慮した上で、地震・津波対策計画を具体的に関係機関が連携して検討することができるようになる。また、災害時の重要拠点や公共機関の位置もマップに示すことにより、ハード対策(公共土木施設の整備・補強)だけでなく、ソフト対策(情報提供や初動体制の改善等)による被害の軽減策を検討することができる。

例として、想定南海地震とその津波を対象に、須崎市周辺の被害想定マップを試作した結果²¹⁾を図-4.10に示す。ここで、南海地震発生時の地震動強さと津波浸水深の分布は、高知県が1854年安政南海地震(M8.4)相当の地震を想定して実施した調査の結果^{27), 28)}を用いている。各施設の被災や浸水域等の評価結果に加えて、地震・津波対策計画を立案する上で参考となる津波到達時間、浸水域、庁舎や病院の位置、橋梁の補強状況などを記載したものとなっている。

図から、この地域では地震による走行性がa(構造的に問題があるため短期間での通行は不可能)と判定されている橋梁が2橋、津波による走行性がaと判定されている橋梁が3橋あり、後者はいずれも取付盛土の全面被害によるものである。これらの道路橋は浸水域に位置していることから、緊急・復旧活動に支障が生じる可能性があることが分かる。この地域では津波によって橋桁が流失すると評価される道路橋はなかったが、別の地域ではそういった評価結果も得られている。

また、この地域では道路の浸水区間における瓦礫の堆積厚さはそれほど顕著ではないが、一部の区間では漁船の漂着可能性があるため、緊急車両等の通行障害となるおそれが指摘される。このような障害の防止には、漁港関係者の協力が不可欠である。

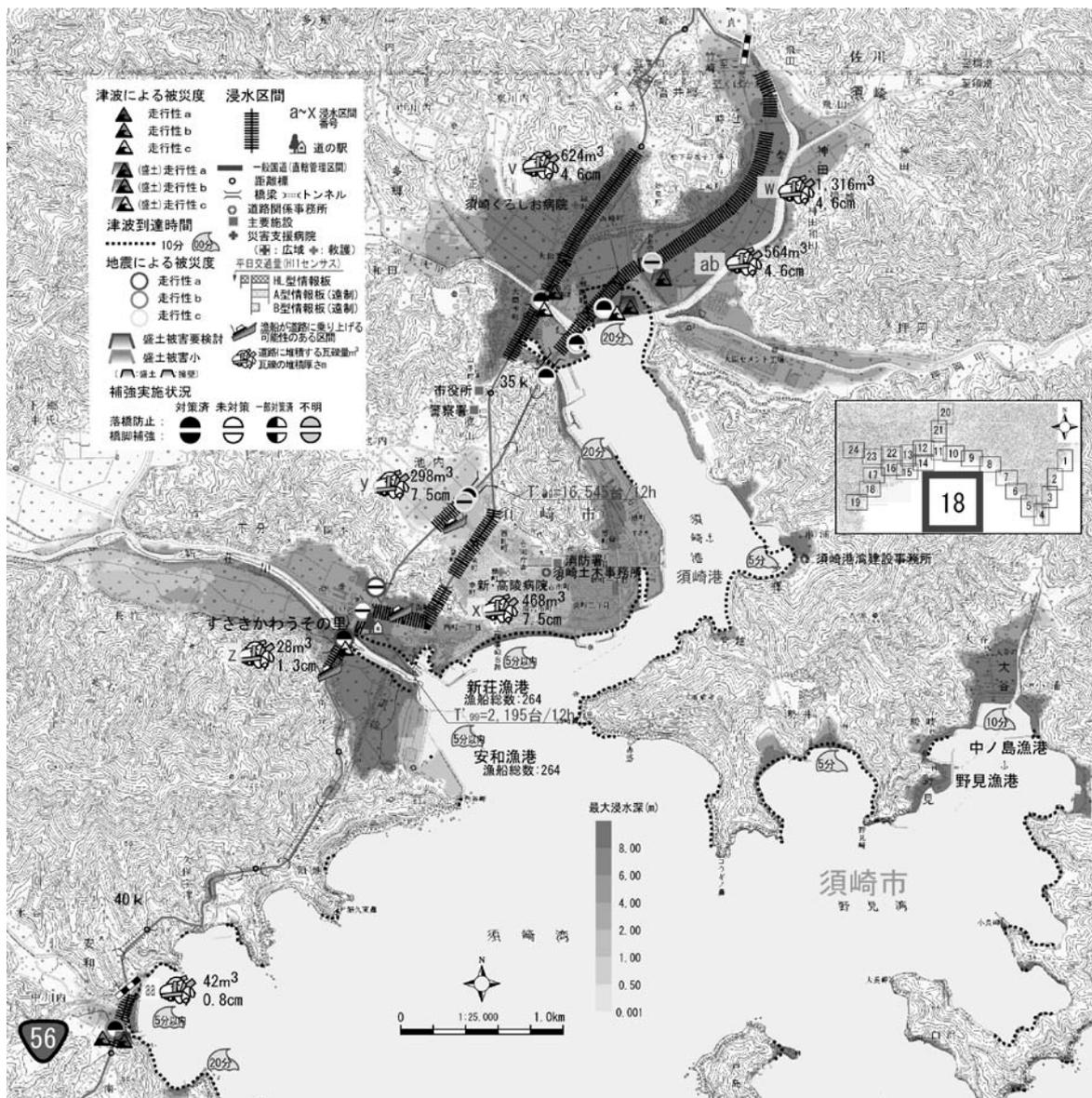


図-4.10 南海地震・津波による須崎市域の道路施設の被害想定マップ（試作版）²¹⁾

4. 2. 2 活用方法

このようなマップを作成することにより、防災訓練の実施、情報提供、避難路・避難場所、効率的な緊急・復旧活動のための事前の計画、被害の軽減に特に有効な津波防御施設や優先的に補強すべき施設などを具体的に検討することができるようになる。海岸堤防などの津波防御施設については、補強や新規建設といった対策を実施する前と実施した後のマップを作成し、浸水域や背後地の被害を比較することにより、対策実施の判断の参考とすることができる。

これらの項目からなる地震・津波対策検討フローを図-4.11 に示すが、このうち情報提供、水門・陸閘の操作計画及び整備（自動化や遠隔操作化）計画や避難路を検討するにあたっては、揺れを感じた直後から津波が到達するまでの時間的余裕を考慮する必要がある。またこれらの前提として、対応にあたる関係者の安全確保や参集の可否を検討しておく必要

なければならない。

たとえば、本研究成果をもとに、岩佐²⁹⁾は高知県東部の国道55号を対象として、4.1.5の手法による南海地震・津波発生時を想定した道路通行障害の予測結果に加えて、斜面災害発生リスクや沿道建物の倒壊リスク等を考慮した上で、被災後3日以内に交通機能を復旧するために必要な土工機械、運搬機械、機械オペレータの必要量を沿岸9市町村別に概算している。その結果と現状の機械保有量とオペレータ数を比較した上で、南国市以外の8市町村ではこれら復旧資源が不足している一方で、比較的余裕のある南国市は隣接する高知市の復旧活動の支援に当たることができる可能性が高いことを指摘している。

このような地域ごとの復旧資源の不足状況を改善していくためには、道路施設の補強を着実に進めていくとともに、自治体（復旧資源の調達のため）、住民や漁協（漂流物の撤去を円滑にするため）、建設会社（通信障害時の自律的な復旧活動のため）等と事前に対処方法に関する協定を結んでおくことも必要となる。

岩佐による研究²⁹⁾を参考に被害想定に基づく分析のイメージを示したものが表-4.6であるが、現時点では復旧作業量や復旧能力の数値化に課題もあるものの、定量的分析により地域ごとの特徴を見だし、戦略的に弱点を克服していくことで復旧能力が向上するものと期待される。

被害想定はこのように被災時の状況をイメージし、具体的な対策計画の立案を支援することができるツールとして不可欠のものである。一方、被害想定はあくまでも具体的な検討を始めるための出発点であり、実際に想定したとおりの状況になることはまずあり得ない。対策計画の立案にあたっては、想定外の事態が発生することも考慮しつつ、柔軟に検討する必要があることを忘れてはならない。

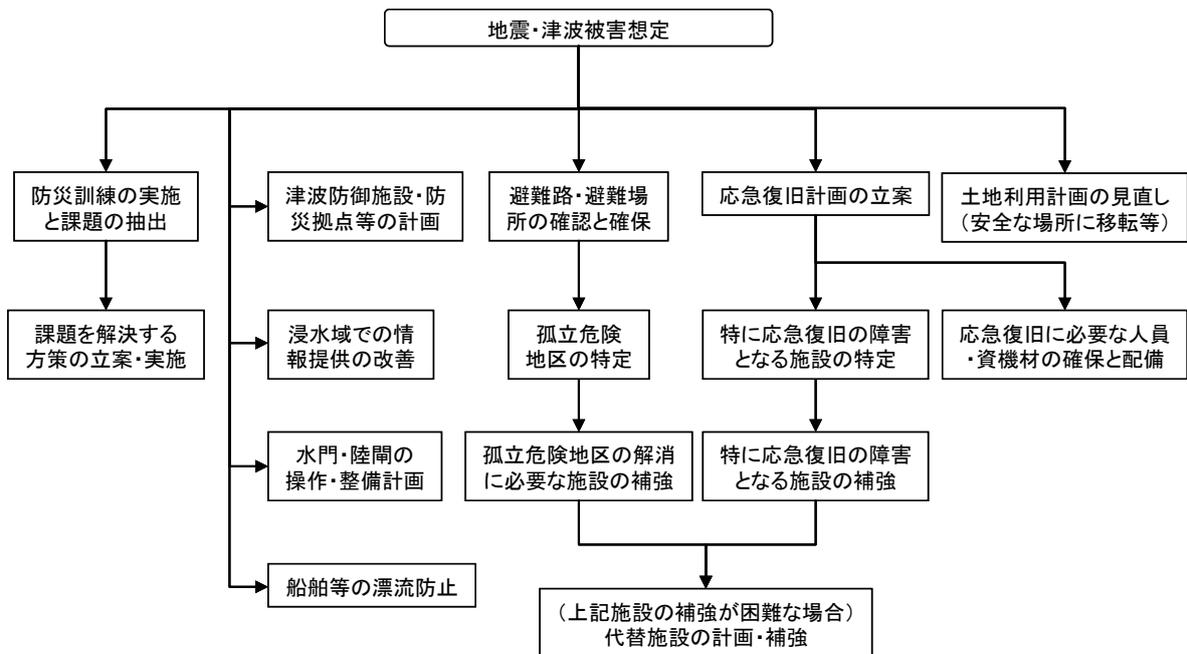


図-4.11 被害想定に基づく地震・津波対策検討フロー⁵⁾

表-4.6 復旧日数、復旧資源の必要量および対応策の分析イメージ

| | 作業量 R | 復旧能力 $C=\min(C_1, C_2)$ | | 復旧日数 R/C | 復旧資源の不足量 | | 対応策等 |
|-----|----------|-------------------------|-------------|-------------|----------|-------|---|
| | | 資機材 C_1 | オペレータ C_2 | | 資機材 | オペレータ | |
| A市 | 10 | 65 | 20 | <1 | - | - | 復旧資源に余裕がある。 近隣市の応援が可能。 |
| B市 | 30 | 3 | 15 | 10 | 27 | 15 | 復旧資源が不足。近隣市 との応援協定の締結を 検討。 |
| C市 | 60 | 80 | 10 | 6 | - | 50 | オペレータが不足。応援協定 の締結を検討。特にオペ レータの育成・確保が必要。 |
| ... | | | | | | | |

R: 各自治体の被害想定結果から総合的な復旧作業量を定量化した値

C: R=1 の作業が 1 日のできる能力を C=1 として復旧能力を定量化した値

5. おわりに

本文では、国土技術政策総合研究所のプロジェクト研究「地域被害推定と防災事業への活用に関する研究（平成 18～20 年度）」の一環として実施した洪水および地震津波災害に対する被災リスクの評価手法に関する研究成果について報告した。

中小河川に対する治水安全度評価手法として、雨量・水位や測量データの整備が不十分な中小河川において航空レーザ測量データをもとに治水安全度を評価するシステムを開発した。本研究成果については、平成 19 年に全地方整備局への説明会を開催し、普及を図るとともに、一級河川指定区間における安全度評価結果を、平成 21 年 4 月現在、71/109 水系を対象に、国土技術政策総合研究所の Web サイトに公表している。

地震及びこれに続く津波により施設に生じる被害想定手法としては、地震と津波の影響を複合的に受けた場合の施設ごとの構造被災度と浸水・がれき等による地域への影響度の評価手法を構築した。個別の海岸・港湾・河川・道路施設を対象とする公共土木施設の地震・津波被害想定マニュアル（案）を作成しており、本マニュアル案については、現場の実務において活用されているところである。

今後、引き続き以下の研究に取り組んでいく必要があると考えている。

- 1) 提案手法の検証、精度向上のためのデータ蓄積と手法の高度化、それに基づく防災対策事業の合理化の支援策の提案
- 2) 災害に対する地域全体の防災力向上の観点での研究開発
 - ・ソーシャルキャピタルの特性に応じた地域防災力向上方策
 - ・複合災害（マルチハザード）のリスク評価と防災事業の効率化

【参考文献】

- 1) 国土交通省河川局：航空レーザ測量による河道及び流域の三次元電子地図作成指針（案）， pp.1-10, 2005.6
- 2) (財)日本測量調査技術協会：《図解》航空測量ハンドブック, pp.59-65, 2004.1
- 3) 今井靖晃、瀬戸島政博、山岸裕、藤原宣夫：解像度の異なる LIDAR データによる都市内樹林の受講計測特性, 測量, Vol.55, No.2, pp.28-32, 2005.2
- 4) 国土交通省河川局監修、(社)日本河川協会編：国土交通省河川砂防技術基準 同解説 計画編, pp.35, 2005.11
- 5) 地震防災研究室，海岸研究室，沿岸防災研究室，水害研究室：公共土木施設の地震・津波被害想定マニュアル（案），国土技術政策総合研究所資料，第 485 号, 2008.
- 6) 海岸保全施設技術研究会編：海岸保全施設の技術上の基準・同解説，2004
- 7) 加藤史訓，稲垣茂樹，福濱方哉：津波により海岸堤防に作用する波力に関する大型模型実験．海岸工学論文集，第 52 巻， pp.756-760, 2005.
- 8) 野口賢二，佐藤慎司，田中茂信：津波遡上による護岸越波および前面洗掘の大規模模型実験，海岸工学論文集，第 44 巻， pp.296-300, 1997.
- 9) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 10) 富樫宏由・平山康志・杉山正弘：ソリトン分裂遡上津波による消波ブロック堤の破壊機構，海岸工学論文集，第 34 巻， pp.517-521, 1987.
- 11) Okamoto, O., Oda, K. and Kumagai, K.: Study on scour by tsunamis – example of port and harbor structures – , ICSE-4, 2008.
- 12) 松富英夫・池田弘樹：大規模実験に基づく流木衝突力の評価法, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp.781-785, 1996.
- 13) 水谷法美・高木祐介・白石和睦・宮島正悟・富田孝史：エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.741-745, 2005.
- 14) 熊谷兼太郎・小田勝也・藤井直樹：津波によるコンテナの漂流・衝突シミュレーションと衝突力の評価，海岸工学論文集，第 54 巻， 2007.
- 15) 国土交通省河川局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説，2007.
- 16) 軽金属協会土木重構造物委員会：アルミニウム合金製水門設計製作指案，1979.
- 17) 国土技術研究センター：津波の河川遡上解析の手引き（案），2007.
- 18) 土木研究所：氾濫シミュレーション・マニュアル（案）－シミュレーションの手引き及び新モデルの検証－，1996.
- 19) 本間仁：低溢流堰堤の越流係数，土木学会誌，第 26 巻， 6 号， pp.635～645， 9 号， pp.849～862, 1940.
- 20) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術，2002.
- 21) 片岡正次郎，鶴田舞，長屋和宏，日下部毅明，小路泰広：道路施設の地震・津波被害想定と対策検討への活用方針，土木学会地震工学論文集， Vol. 29, pp. 918-925, 2007.
- 22) 小林寛，運上茂樹：大地震時における道路橋の被災度推定手法，土木技術資料， Vol. 47, No. 12, pp. 48-53, 2005.

- 23) 土木研究所：道路盛土の簡易耐震性評価法（案），2003.
- 24) 首藤伸夫：津波による海岸堤防・護岸の被災－昭和 8 年三陸大津波から昭和 35 年チリ津波まで－，津波工学研究報告，Vol. 16, pp. 1-37, 1999.
- 25) 片岡正次郎，日下部毅明，長屋和宏：津波衝突時に橋桁に作用する波力，第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 154-157, 2006.
- 26) Unjoh, S.: Damage to transportation facilities, The damage induced by Sumatra earthquake and associated tsunami of December 26, 2004, pp.66-76, 2005.
- 27) 高知県：第 2 次高知県地震対策基礎調査, 2004.
- 28) 高知県：高知県津波防災アセスメント補完調査報告書, 2005.
- 29) 岩佐隆：南海地震に対する高知県東部地域の交通機能復旧のあり方について，高知工科大学大学院修士論文, 2008.