

地震と洪水の複合災害による 被害試算と被害特性の分析

CASE STUDY ON POTENTIAL DAMAGE AND THE DAMAGE CHARACTERISTICS BY THE MULTIPLE DISASTER OF EARTHQUAKES AND FLOODS

松浦達郎¹・板垣修²・服部敦³

Tatsuro MATSUURA, Osamu ITAGAKI and Atsushi HATTORI

¹非会員 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室主任研究官（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

²正会員 同上 主任研究官

³正会員 博（工） 同上 室長

In this study, we proposed a procedure for estimating the potential damage caused by multiple disasters, and consideration points for countermeasures against the multiple disasters. We assumed a multiple disaster in which a flood occurs after an earthquake, and estimated the potential damage in a river (about 60km length). We estimated each damage in 12 cases changing the interval between the earthquake and the flood, and the scale of the earthquake. We also estimated the days required for the emergency works for the levees and roads, and the emergency rescue activities after the earthquake. We analyzed the risk in each period of the emergency work duration, and found that not only decreasing the damage caused by the earthquake, but also shortening the length of emergency work duration was important to reduce the damage caused by the multiple disaster.

Key Words : multiple disaster, emergency work, potential damage, risk

1. はじめに

東日本大震災以降、これまで想定外とされてきた低頻度・大規模災害に対しても、事前に減災対策を立ておくことの重要性が認識された。河川においても津波¹⁾や気候変動を見据えた大規模洪水²⁾について検討が進められている。こうした災害として、洪水と地震が同時、若しくはほとんど間を置かずに連続して発生する複合災害が挙げられる。過去には、福井地震（昭和23年）や新潟県中越地震（平成16年）のように、地震発生前後1ヶ月以内に豪雨が発生し被害を受けた事例も知られている³⁾。そこで本研究は、地震発生後に洪水氾濫が生じる複合災害を対象として、地震発生後の復旧状況を区分して洪水被害想定を行い、継続日数と被害者数が相対的に大きい区分を明らかにするとともに、その被害低減に効果の高い対策について検討したものである。

2. 地震と洪水による複合災害対策検討の考え方

地震発生に次いで洪水が生じる複合災害の場合、最初に発生した地震の規模によって河川構造物や堤内地での

被害が異なり、その復旧に必要な日数も異なる。一般的には、地震の規模が大きければ被害も大きく、復旧に必要な日数も長くなるため、その後の洪水被害が拡大しやすくなると考えられる。一方、地震の規模が小さく被害が大きくない場合でも、地震直後のように復旧が進んでいない状態で洪水が発生した場合は、洪水単体で発生するよりも被害が大きくなる可能性がある。したがって複合災害対策を検討する場合、地震災害の規模のみに着目するだけでは不十分であり、復旧状況も視点として加えることが重要である。以上より、堤内地や堤防の復旧状況を区分し、各区分の継続日数とその区分での洪水被害を算定し、相対的に日数が長くかつ被害規模が大きい区分を高リスクと評価し、高リスクを低減する対策（被害の低減と日数の短縮）を優先的に検討することを考えた。

本研究では、一級河川国土交通大臣直轄管理区間を念頭に設定した延長約60kmのモデル河川を対象として、地震と洪水の規模及び両者の生起間隔を体系的に変化させるとともに、堤内地の被害が河川構造物の復旧作業に与える影響を過去の実績等から設定した上で、人的被害等と復旧に要する日数の試算を行った。なお今回は、地震被害として揺れによる被害を主な対象としており、津波や地盤沈下に関する被害については想定していない。

表-1 モデル河川諸元

項目	諸元
流域諸元	幹川流路延長
	約200km
モデル区域内諸元	流域面積
	約5000km ²
	直轄管理区間
	約60km
	氾濫区域面積
	約600km ²
	河床勾配
モデル区域内諸元	1/500～1/5,000程度
	氾濫区域内人口
	約2,200,000人
	氾濫区域内資産
	約68.6兆円
土地利用形態	建物:29%、農地:37%、
	河川等:14%、その他:20%

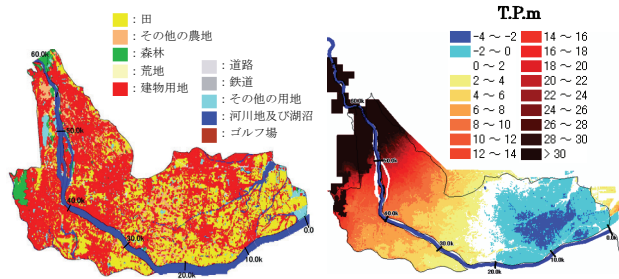


図-1 モデル区域の概要（左：土地利用状況、右：地盤高）

また、洪水時の高潮の同時生起については考慮していない。次に、試算結果を被害の規模及び継続日数の関係として整理し、被害特性の分析を行った。

3. 複合災害想定の対象とした流域・地震・洪水

今回検討対象としたモデル河川の諸元を表-1に、また、モデル河川の氾濫区域（以下、モデル区域）内の土地利用・地盤高の状況を図-1にそれぞれ示す。モデル河川の下流域は低平地であり、浸水被害が生じやすい。この流域について、以下のように複合災害の想定を行った。

地震規模については、中央防災会議による、南海トラフの巨大地震⁴⁾及び東海・東南海・南海地震⁵⁾の予測結果を基に、モデル区域内の震度分布を推定し、図-2に示す規模が異なる3つの地震を設定した。本研究ではこれらを便宜的にL2、L1'、L1と呼ぶが、一般的に受け入れられた定義では必ずしもないことに留意されたい。

洪水規模については、モデル河川上流端でのピーク流量が約15,000m³/sの整備方針規模の出水を設定した。

また洪水による被害については、表-2に示すとおりモデル区域内の避難状況や堤防の復旧状況が異なる時期に区分して試算した。なお、地震により沈下した堤防の復旧高はHWLまでとし、氾濫被害が相対的に大きい左岸下流部10～23.2km区間を優先的に復旧する設定とした。

4. 地震による被害の想定

複合災害による被害試算にあたっての、各被害の想定フロー図を図-3に示す。このフローに基づき、地震によ

表-2 洪水発生時期

洪水発生時期	状況	区分
地震直後	道路啓開前のため区域外への避難不可 堤防復旧は全く進んでいない	I
道路啓開後	堤防復旧は全く進んでいない	II
堤防復旧20%	左岸下流部10.0～23.2kにおいてHWL-1.6m まで復旧が完了	
堤防復旧50%	左岸下流部10.0～23.2kの緊急復旧が完了	III
堤防復旧完了	緊急復旧が完了	IV
洪水単独	洪水が単独で発生した場合の被害	

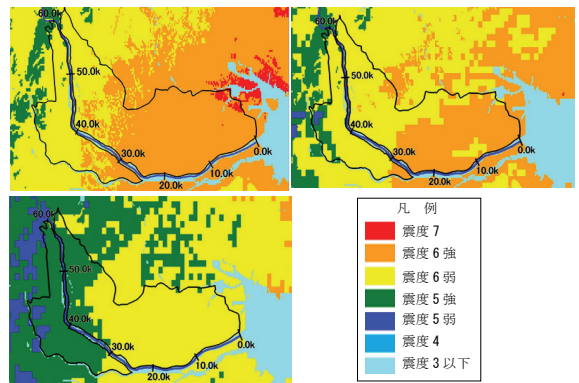


図-2 想定震度分布（左上:L2、右上:L1'、左下:L1）

る被害や洪水発生までの復旧状況等を想定した。まず、地震による被害として、停電による避難情報の伝達困難な世帯数、道路被害、建物被害、人的被害、河川堤防の沈下を以下の方法により想定した。

(1) 停電による避難情報の伝達困難な世帯数

東日本大震災時の実績⁶⁾を基に、地震直後の震度別停電率を震度6弱以上:96%、震度5強:43%、震度5弱:22%、震度4:13%、震度3以下:0%とした。これを用いて、モデル区域内の停電世帯数を推定し、洪水発生時の避難状況を設定した。なお、ここで設定した停電世帯は、洪水時に避難行動をとれないものとして被害を試算した。

(2) 道路啓開必要日数及び建物被害の推定

地震によって被害を受けた幹線道路の啓開作業に必要な日数を推定した。まず「中部版くしの歯作戦」⁷⁾を参考に、L2時の道路啓開必要日数を3日に設定した。次に、中央防災会議による南海トラフ巨大地震の被害想定手法（以下、南海トラフ想定手法）⁸⁾を用いて、地震規模毎の道路被災箇所数を算定し、L2時の被災箇所数との比率により、L1'を3日、L1は2日と設定した。

また南海トラフ想定手法を用いてモデル区域内家屋の全・半壊戸数を推定するとともに、推定した家屋の全・半壊率より、モデル区域内の避難施設の被害を推定した。

(3) 地震による人的被害の推定

建物倒壊による死者・要救助者及び避難者を南海トラフ想定手法により推定した。なお要救助者の生存率については、阪神・淡路大震災の実績⁹⁾を参考に発生当日:75%、2日目:25%、3日目:15%、4日目以降:0%と設

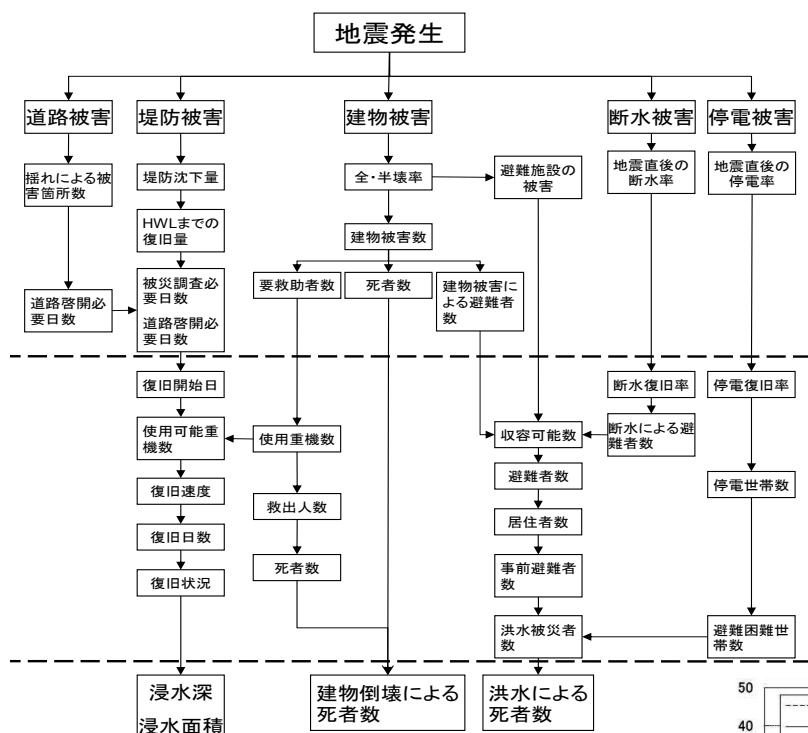


図-3 複合災害による被害想定フロー

定した。また避難者は、建物全壊と断水によるものに分けて推定した。断水による避難者の推定は、地震直後の断水率と避難率の関係を調査した川上による手法¹⁰⁾から算出した。水道復旧率は、都市部における水道事業者の事業継続計画¹¹⁾を参考に、発災後4日目までは被災調査等のため復旧率0%、復旧作業は5日目から開始し、28日目に完了すると想定した。したがって、断水による避難者は断水状況に応じて時間的に変動する。なお洪水被害の算定にあたっては、避難施設の収容人数を超える避難者はモデル区域外へ避難するものとし、その人数を人口より減じて算定した。

(1)～(3)により試算した被害状況を表-3に示す。

(4) 地震による堤防沈下量の推定

河川堤防の耐震点検マニュアルに記載されている簡易式¹²⁾によって算定した200m毎の堤防沈下量を、堤防耐震性能照査¹³⁾結果により補正することで、地震規模毎に堤防沈下量を推定した。図-4に地震による沈下後の堤防高の縦断面図を示す。沈下は、左岸40kmより上流部において、地震規模に応じた差が若干生じているものの、それ以外の区間では顕著な差は現れなかった。

5. 洪水発生までの危機対応の想定

以上の地震被害状況下での危機対応として、建物被害に伴う救助作業及び河川堤防の緊急復旧作業を想定した。

(1) 危機対応で使用可能な重機数の設定

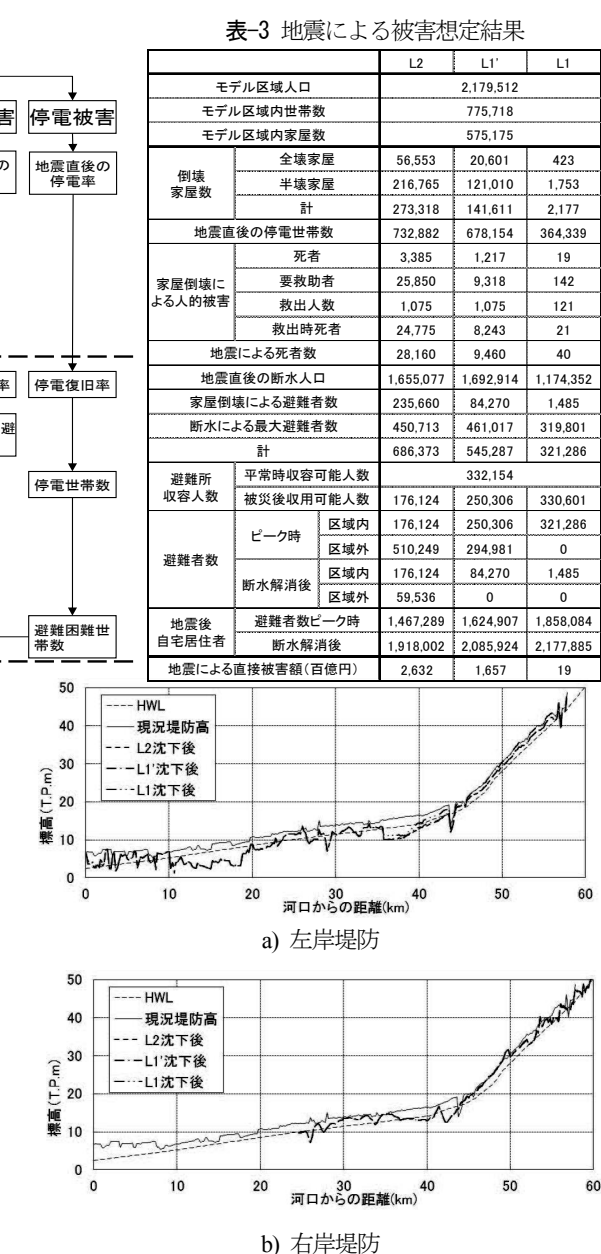


図-4 地震による沈下後の堤防高縦断面図

危機対応で使用可能な重機は、河川管理者と災害協定を締結している業者（以下、協定業者）が所有しているものを対象として設定した。そのうち、道路啓開前はモデル区域内に位置する協定業者のみを対象とし、道路啓開後はモデル区域を含む自治体内の協定業者まで対象を広げた。その結果、使用可能重機数は、道路啓開前はバックホウ228台、ブルドーザ51台、ダンプトラック200台、道路啓開後はバックホウ447台、ブルドーザ100台、ダンプトラック480台となった。これら重機の救助作業と復旧作業での使用台数への割り振りを設定する必要がある。そこで、東日本大震災で被災した東北地方における直轄管理河川での緊急復旧工事の実績を調査し、これを参考に設定した。図-5は、河川での緊急復旧工事で実際に稼働していた重機数を基に、協定業者が所有する全重機数に対する使用率を推定したものである。この図よ

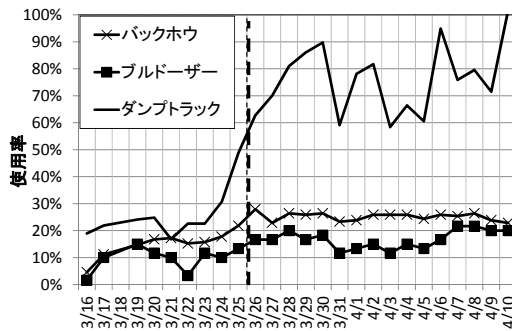


図-5 東日本大震災での河川緊急復旧工事における重機の使用状況（対象：東北地方整備局管内の直轄管理河川）

り、バックホウ・ブルドーザは使用可能台数の20%、ダンプトラックは作業開始9日目までは20%、10日目以降は70%の使用率とし、これら以外は救助作業で使用するものとした。但し、救助作業が完了した場合は、復旧作業で100%使用できる設定とした。

(2) 建物被害に伴う救助作業の設定

救助作業は消防機関で対応すると想定し、モデル区域と同程度の規模の氾濫区域を持つ自治体の消防年報等から、モデル区域内の消防機関人員数を約5,900人と設定した。このうち、救急隊員や通信指令要員等他の作業に従事する人員を考慮し、全体の75%に相当する約4,500人を救助作業人員として設定するとともに、要救助者1名の救助に必要な時間を、救助隊5人編成で木造建物の場合117分、非木造建物の場合252分と設定¹⁴⁾した。さらに1日の作業時間は9時間とし、救助隊1班が1日に救出できる人数（救助効率）を、木造建物は4.6人、非木造建物は2.1人と設定した。また、救助作業で使用する重機数は、東日本大震災で実際に救助作業に携わった組織への聞き取り調査等から、救助隊1隊につき、バックホウ1台を割り当てることとした。そのため、救助隊数は重機数に制限され、道路啓開前までは228隊、道路啓開後～復旧作業開始前までは447隊、復旧作業開始後は358隊となる。表-4に1日あたりの救助可能人数を示す。

以上より、救助作業完了までの日数は、地震発生当日を含めてL2で23日、L1'で10日、L1で1日となった。

(3) 河川堤防の緊急復旧作業日数の設定

復旧作業は、道路啓開後及び堤防被災調査完了後に開始するものし、被災調査日数は東日本大震災や新潟県中越沖地震における1日あたりの調査実績等より、規模に関わらず5日間とした。したがって復旧作業の開始は、地震発生後6日目からとなる。さらに作業は24時間実施する。復旧に必要な土量と1日あたりの復旧量を表-5に示す。河川堤防の緊急復旧作業完了までの日数（堤防被災調査に要する5日間を含む）は、地震発生当日を含めてL2で37日、L1'で27日、L1で20日となった。

表-4 1日あたり救助可能人数

	救助隊数	救助効率 (人/隊・日)		1日あたり 救助可能人数
	計	木造	非木造	計
道路啓開前	228	4.6	2.1	933
道路啓開後～ 復旧作業開始前	447			1832
復旧作業開始後	358			1466

* 1日あたり救助可能人数は被災家屋の木造・非木造比率に応じて救助隊数を案分し算定。

表-5 復旧土量と1日あたり復旧量

地震規模	復旧土量 (m ³)	1日あたりの復旧量(m ³)				地震直後から 復旧完了までの日数
		10日目迄	11～14日	15～23日	24日目以降	
L2	1,438,085	16,000	16,000	21,000	80,000	37
L1'	1,379,007	16,000	80,000	80,000	80,000	27
L1	1,132,027	80,000	80,000	80,000	-	20

表-6 地震後に発生する洪水による人的被害の考え方

地震による要救助者の被害	避難率は0%とし、1階床面から危険水位帯として算定
半壊家屋居住者の被害	年齢に関わらず上階へ避難ができないと考え、1階床上から安全水位帯、準危険水位帯、危険水位帯を設定
洪水時の避難行動	地震による避難者の避難率は100%、一般住民の避難率は40%、停電世帯の避難率は0%で設定

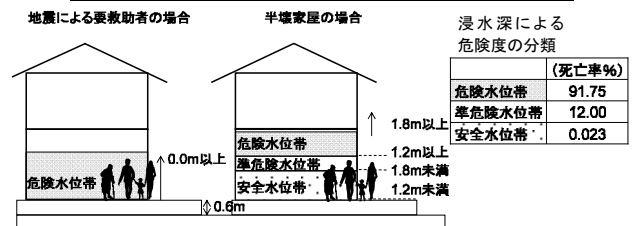


図-6 地震による被害を考慮した洪水人的被害推定

6. 複合災害による被害の試算と被害特性の分析

これまでに設定した状況で、表-2に示すタイミングで洪水が発生した場合の氾濫計算を行い、被害を試算した。なお、氾濫計算は治水経済調査マニュアル（案）¹⁵⁾に基づき、地震による被害を考慮した上で算定した。また人的被害はLIFESim¹⁶⁾に準ずる方法により試算した。今回用いた人的被害の考え方を、表-6及び図-6に示す。

(1) 洪水氾濫計算結果

表-2に示すタイミング毎の洪水氾濫計算を実施した結果の一例を図-7に示す。洪水単独による結果と比較すると、地震直後の平均浸水深は約3倍に、浸水面積は約4倍に増加した。これは、地震により堤防が沈下したためと考えられ、複合化による被害増加の要因となった。一方、地震規模毎の氾濫状況を比較すると、堤防沈下量に差が

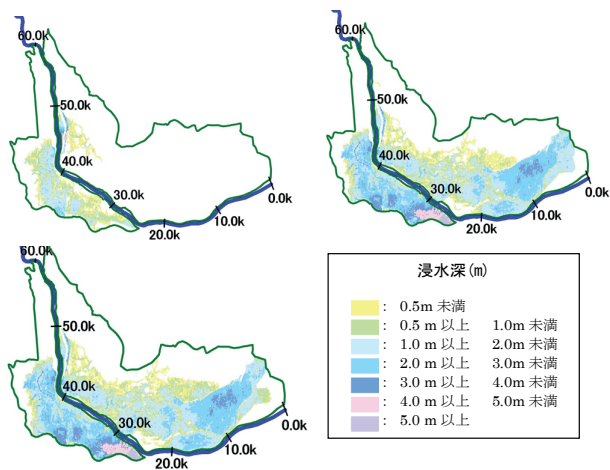


図-7 洪水氾濫計算結果（左上：洪水単独，右上：L2直後
左下：L1直後）

表-7 洪水による人的被害試算結果

復旧状況	経過日数	地震規模	死者数 (人)
		洪水単独	234
地震直後	0	L2	37,589
	0	L1'	22,792
	0	L1	1,781
道路啓開後	4	L2	21,937
	4	L1'	15,229
堤防復旧20%	22	L2	9,434
	13	L1'	3,469
堤防復旧50%	28	L2	11,193
	18	L1'	3,228
堤防復旧完了	37	L2	1,344
	27	L1'	435

小さいため、顕著な差は生じていない。

(2) 被害の試算と被害特性の分析

氾濫計算結果に基づき算定した、人的被害の試算結果を表-7に示す。洪水単独発生時の被害と比較すると、複合化することで洪水被害が大きく増加する。特に地震直後に洪水が発生すると、洪水による死者数は表-3に示した地震単独による死者数よりも大きくなる。ここで、L2～L1の被害を比較すると、図-7に示したように地震規模によって氾濫状況に大きな差が無いにも関わらず、L1の被害に対してL2は20倍以上、L1'は10倍以上と非常に大きな被害となっている。一方、表-3に示す地震規模毎の建物被害を比較すると、L1の被害に対してL2は100倍以上、L1'は50倍以上の被害が発生している。これらより、地震との複合化による洪水被害の拡大は、地震による建物被害の影響が大きいと推察される。つまり、堤防沈下による浸水深・面積の拡大に加え、地震での建物倒壊による要救助者に対して被害が発生することや、半壊建物により洪水時の垂直避難が困難になること等が主因と考えられる。このことは建物被害を伴う地震後は、洪水による人的被害が大きくなりやすいことを示唆する。

図-8に地震後の経過日数とモデル区域内の居住者（避難せず自宅にいる住民）、堤防復旧速度、洪水による死者数の関係を示す。これより、堤防の復旧作業が進むにつれて死者数は大きく減少し、復旧作業の進捗が被

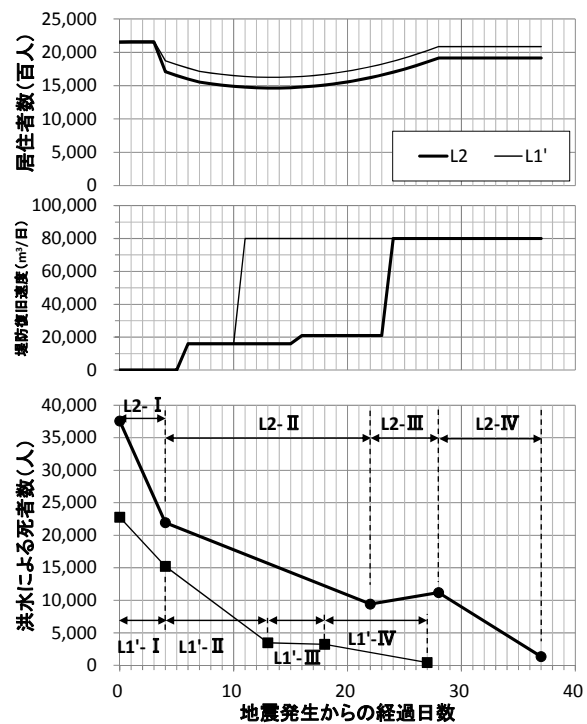


図-8 経過日数と人的被害等の関係

害低減に大きく影響することがわかった。但しL2時のみ20%復旧時よりも50%復旧時の死者数が大きくなった。これは、地震に伴う断水によって発生する避難者のうち、モデル区域内の避難所が収容能力を越えたために一時的に区域外へ避難していた避難者が、断水の解消とともに区域内の住居に戻ってきた結果、区域内の人口が20%復旧時よりも50%復旧時の方が多くなったためである。

さらに、復旧作業完了までの日数は地震規模が大きい方が長くなった。地震規模による堤防被害に大きな差が無いにも関わらず、復旧作業完了までの日数に差が出たのは、堤内地における救出作業に影響を受け、復旧速度に差が生じたためである。

次に、堤防の復旧状況を表-2のとおり区分し、各区分の継続日数と洪水被害より、各区分のリスク評価を試みた。これは、継続日数が長いほど当該期間に洪水が発生する可能性が相対的に大きくなることを考えたためである。ここで被害は、区分期間内の死者数を平均した区間平均死者数を用いた。今回は、表-8に示す考え方でリスクを区分し、表中の数値が大きい区分ほど高リスクと評価した。区分毎の継続日数と被害の関係を整理した結果を図-9に示す。これより、最も高いリスク区分になったのはL2-IIとなった。L2-IIは、被害自体は3番目の大きさだが、継続日数が最も長い。これは、倒壊建物の救助作業に影響され、復旧速度が低いためである。復旧速度を向上する方策としては、使用可能重機数の増加や、地震による建物及び堤防被害そのものを減少させることが考えられる。特に建物及び堤防の耐震性向上は、復旧速度だけでなく、地震直後、つまりL2-I及びL1'-Iの被害抑制にもつながり、全体的なリスク低減効果は大きいと考

表-8 リスク区分^{*)}の考え方

区間平均死者数	継続日数		
	7日未満	7日以上14日以下	14日超
1万人超	4	5	6
5千人以上1万人以下	2	3	5
5千人未満	1	2	4

*)リスク区分は以下を参考に設定

区間平均死者数：東日本大震災における死者数(戦後最大)

継続日数：地震被災時の堤防緊急復旧工事に係る標準的な日数(14日)

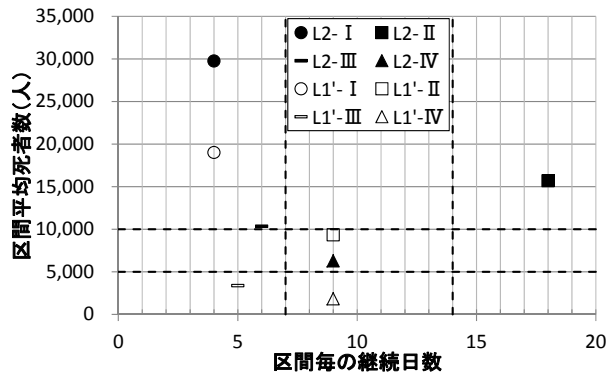


図-9 継続日数と人的被害の関係

えられる。L2-IIIは、復旧速度が速く継続期間は短い、被害が小さくないためL2-IやL1'-Iと同じリスク区分となった。これは、区域外の避難者が区域内に戻ってきた結果居住者が20万人以上増加しており、そのため復旧の進捗に対して被害が低減しにくかったと考えられる。また、L1'-IVは、被害が最小だが、継続期間が短くないため、L1'-IIIよりも高いリスク区分となった。これらのことは、複合災害によるリスク低減には、できるだけ早期(特に避難者が住居に戻る前)に復旧作業を終了させること、また、区域内の復旧状況に応じた、避難者の適切な誘導が重要であることを示唆する。

7. おわりに

本研究で得られた主要な結果を下記に示す。

①地震発生後に洪水が重畳する複合災害を想定し、モデル河川において被害の試算を行った。その結果、地震規模に関わらず、洪水被害は単独時よりも複合化した方が大きくなった。また洪水被害は、地震により被害を受けた堤防の復旧状況に影響され、人的被害は復旧が進んでいない地震発生直後が最も大きく、復旧が進むほど一般に減少する傾向がみられた。

②洪水による人的被害を主に堤防の復旧状況で区分し、その区分毎の死者数と継続日数でリスク評価を試みた結果、L2-Iに比べて死者数は半減するものの戦後最大規模の1万人を超える値となり、かつ継続日数では4.5倍となるL2-IIも高リスクと捉えられた。これは、一般的に最も被害が大きくなると考えられる地震直後の洪水のみを被害低減対策の対象とするのではなく、復旧期間にも

着目した対策が重要であることを示唆している。例えば、洪水被害は、区域内の居住者数に影響を受けるため、地震による避難者を区域内の復旧状況に応じて適切に誘導できる対策が重要であると考えられる。

③堤防・建物の耐震化は、地震による建物被害や人的被害の軽減だけでなく、洪水との複合化による人的被害の軽減や堤防復旧作業に要する日数の短縮にも大きな効果が期待できる。

今後は、各被害特性についてさらに分析を進めた上で、各条件で最も効果的な被害低減方策について検討を進める予定である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、一般社団法人仙台建設業協会、宮城県解体工事業協同組合、東北地方整備局河川計画課、北陸地方整備局河川工事課及び信濃川河川事務所の方々には、資料提供等多大なご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 河川津波対策検討会：河川への津波遡上に対する緊急提言，2011.8.
- 2) 服部敦，板垣修，土屋修一，加藤拓磨，藤田光一：気候変化の治水施策への影響に関する全国マクロ評価，河川技術論文集，第18巻，pp.481-486，2012.6.
- 3) 中央防災会議：1948福井地震，災害教訓の継承に関する専門調査会第4期報告書，2011.3.
- 4) 中央防災会議：南海トラフ巨大地震対策について（最終報告）～南海トラフ巨大地震の地震像～，2013.5.
- 5) 中央防災会議：東南海，南海地震の被害想定について，東南海，南海地震等に関する専門調査会第14回資料，2003.9.
- 6) 消防庁：東日本大震災記録集，2013.3.
- 7) 中部地方幹線道路協議会：平成24年度「中部版 くしの歯作戦」，2013.5.
- 8) 中央防災会議：南海トラフ巨大地震の被害想定項目及び手法の概要，2013.3.
- 9) 国土交通省近畿地方整備局：阪神・淡路大震災の経験に学ぶ，2002.1.
- 10) 川上英二：震度，被害率，断水率の関係，土木学会第53回年次学術講演会，1998.10.
- 11) 名古屋市上下水道局：事業継続計画地震対策編，2012.3
- 12) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル，2012.2
- 13) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川構造物の耐震性の照査指針・解説，2012.2.
- 14) 岐阜県：岐阜県東海地震等被害対応シナリオ作成業務報告書，2003.
- 15) 国土交通省河川局：治水調査経済マニュアル（案），2005.7.
- 16) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準調査編，2012.6.

(2014.4.3受付)