

## 第3章 複合災害に対する危機管理に関する研究

### 3.1 研究の概要

東日本大震災は、従来の経験や想定を大きく超える規模の自然災害であり、堤防の沈下等、地震による被害を受けた直後に大津波が生じたことで被害は甚大なものとなった。この災害を契機として、低頻度・大規模災害に対して、事前に減災対策を立てておくことの重要性が強調された<sup>1)2)3)</sup>。こうした災害の1つとして、洪水と地震が同時も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（1948年）や新潟県中越地震（2004年）のように、地震発生前後1カ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<sup>4)</sup>。さらに今後、地球温暖化による各種気象の極端現象が出現しやすくなると、被災からの復旧・復興事業の優先順位を次の災害発生の危険性を考慮して決めるという新しい考え方も必要となってきた<sup>5)</sup>。

複合災害の被害低減策については、予め考え得る範囲においてシミュレーションをし、被害範囲及び被害規模の想定や各種対策の効果を事前に把握しておくことが重要である。実際に被災が生じた場合、可能な限り被害を低減するためには的確な対応とともに迅速な対応も求められる。事前に情報を把握・整理しておくことにより、その初動対応が異なることを認識する必要がある。本稿で示した手法等を活用した演習を実施し、事前に複合災害時の状況を把握しておくことは、若手現場職員等の危機管理能力向上に有効と考えられる。

自然災害が複合した際の被害は、先に生じる自然災害による防災施設・住家等の被災・復旧状況等によって、その後生じる自然災害の被害が異なる特性を持っていると考えられる。複合災害に対する減災対策は、この特性を踏まえて検討する必要があるが、本特性を把握する手法や対策を決定する際の考え方は確立されておらず、複合災害対策の検討の課題となっている。以下で示す結果は、こうした課題を過去の被災事例等を通じて想定した上での試算結果であり、地震と洪水が重畳する一事例を対象としたケーススタディである。こうした点から、本手法は一般論には至っていないが、試算によって本手法の有効性を確認しており、複合災害に対する危機管理を検討する上での検討手順や結果の整理方法として参照されたい。

### 3.2 複合災害の概念

本研究ではまず、モデル河川を対象として、地震発生後に洪水が重畳する複合災害を想定し、被害の試算を行った。その結果から、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、復旧が進むほど減少する傾向を示した上で、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

も着目することが重要であることを指摘した。

次に、複合災害時の被害低減の観点を河川整備の計画検討時等に具体的に考慮することを目的として、複合災害時の被害特性分析手法をより幅広い複合災害ケースに適用し、被害低減対策ごとの被害低減効果について試算・分析し、被害低減対策検討上の留意点を抽出・整理した。

さらに、地震後の復旧状況を可能な限り具体的に想定した上で、地震と洪水の複合災害に対する対策の効果や特性について検討した。具体的には、既存の手法や結果を組み合わせる被害を試算するとともに、地震や洪水の単独発生時を想定した現実的に実施しうる防災・減災対策に対して地震と洪水を連続して作用させ、その際の人的被害を算定した。さらにその算定結果を、被害の規模と復旧に要する期間の短縮の2つの観点から分析し、複合災害対策を検討する際の留意点について抽出した。

なお、本項目は、参照文献 6)、7)、8) を本研究報告書の趣旨に鑑み、再構成したものである。

### 3. 3 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

#### 3. 3. 1 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、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被害がより大きくなる可能性がある。したがって複合災害時の被害低減対策を検討する際には、地震と洪水の規模に着目するだけでは不十分であり、復旧状況やそれらに関連する他の作業との相互作用等を如何にして試算に組み込むかが重要なポイントとなる。そこで、本研究では堤内地の住宅・道路・電気及び堤防等施設の復旧状況を時系列で整理し、各復旧状況に至るまでの経過日数と各復旧状況において洪水が発生した場合の被害を試算し、さらに、被害低減対策ごとの効果について試算・分析した。

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・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工事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、津波や地盤沈下による被害は考慮していない。また、洪水時の高潮の同時生起についても考慮していない。

#### 3. 3. 2 複合災害時の被害の試算・分析の対象とした流域・地震・洪水

今回検討対象としたモデル河川・氾濫区域（以下「モデル区域」）の概要を表3.3.1

に、地震発生後の経過によるモデル河川・区域の概況を表3.3.2に、モデル河川氾濫区域内の地盤高及び世帯数を図3.3.1示す。なお、表3.3.2中のⅠ～Ⅴは、後に示す図3.3.7における呼称である。モデル河川の特徴として、下流部は地盤高が低く浸水被害が生じやすい地域であること、地盤高が低い地域にも少なからず世帯が分布していること、右岸側と比較し左岸側に世帯が集中していることが挙げられる。なお下流右岸は山付き区間として設定している。

表3.3.1 モデル河川・区域の概況

流域の概要	幹川流路延長	約200km
	流域面積	約5,000km <sup>2</sup>
氾濫域の概要	直轄管理区間	約60km
	氾濫区域面積	約600km <sup>2</sup>
	河床勾配	1/500～1/5000程度
	氾濫区域内人口	約2,200,000人
	氾濫区域内資産	約69兆円
	土地利用形態	建物:29%、農地:37%、河川等:14%、その他:20%

表3.3.2 地震発生後の経過によるモデル河川・区域の概況

地震発生後の経過	モデル河川・区域の概況	
地震発生直後	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
道路啓開直後	主要道路は啓開、堤防復旧工事未着手	Ⅱ
堤防緊急復旧20%	左岸下流部10.0～23.2kにおいてHWL-1.6m まで緊急復旧が完了	Ⅲ
堤防緊急復旧50%	左岸下流部10.0～23.2kの緊急復旧が完了	Ⅳ
堤防緊急復旧完了	堤防の緊急復旧が完了	Ⅴ

地震による河川構造物や堤内地の被害（人的、建物）状況を想定するため、3つの規模の地震動を設定した（表3.3.3、図3.3.2）。南海トラフの巨大地震<sup>9)</sup> 及び東海・東南海・南海地震<sup>10)</sup> をモデル河川に当てはめた際に想定される震度を参考とし、震度分布のメッシュサイズを250mに統一（250mよりも大きなメッシュについては250m毎に分割）した上で震度分布を設定した。以下、地震の規模の大きいものからE2（モデル区域での最大震度6.5）、E1'（同6.2）、E1（同5.8）と呼ぶ。

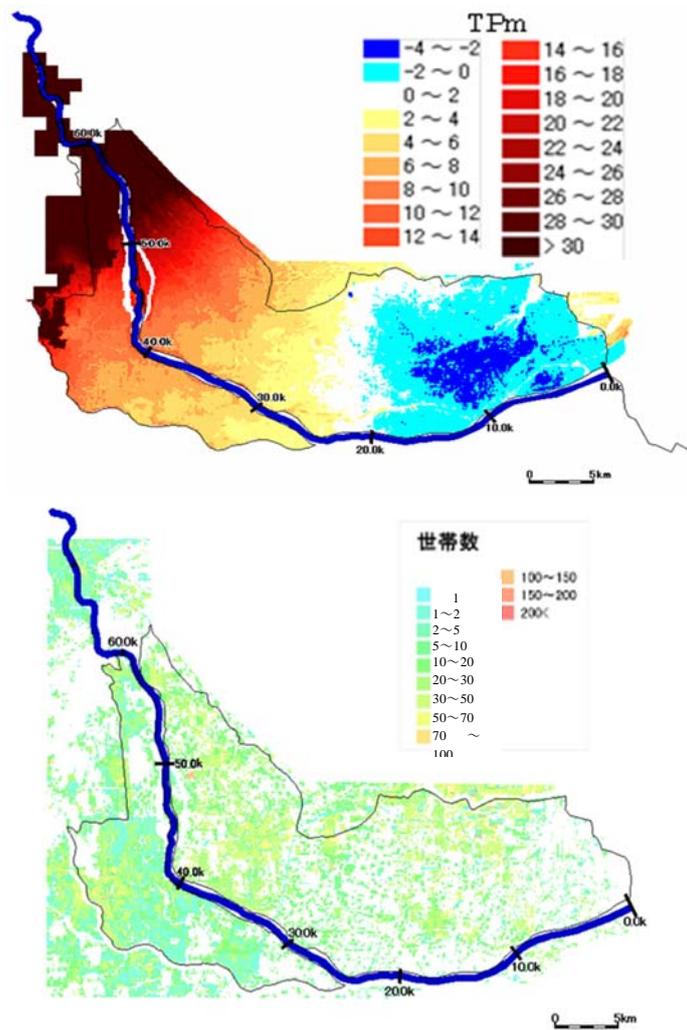


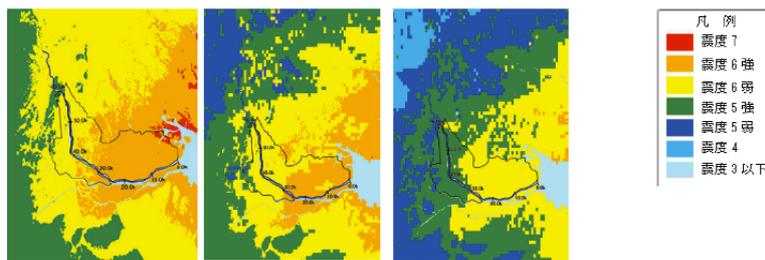
図3.3.1 モデル河川氾濫区域内の地盤高及び世帯数

洪水は、表 3.3.4 に示すとおり、モデル河川の流下能力規模の洪水（以下、「洪水規模 1」という）とそれを上回る規模（以下、「洪水規模 2」という）の 2 種類の洪水規模を設定した。モデル河川最上流端のピーク流量は、洪水規模 1 で概ね 8,000m<sup>3</sup>/s、洪水規模 2 で概ね 15,000m<sup>3</sup>/s とした。

洪水による被害については表 3.3.2 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点に区分して各試算した。なお、地震により沈下した堤防の緊急復旧高は HWL (計画高水位) 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。

表3.3.3 設定した地震動

本研究での呼称	参考とした地震	モデル河川区域における最大震度	設定方法
E2	南海トラフ巨大地震	6.5	発生確率が低く、甚大な被害が生じる最大クラスの地震動
E1'	E1及びE2の中間	6.2	E1及びE2の中間程度である地震動(東海・東南海・南海地震の震度+0.4)
E1	東海・東南海・南海地震	5.8	堤防沈下は生じるが、堤内地の家屋倒壊は僅かである地震動



本研究での呼称	参考とした地震	モデル河川区域における最大震度	設定方法
E2	南海トラフ巨大地震	6.5	発生確率が低く、甚大な被害が生じる最大クラスの地震動
E1'	E1及びE2の中間	6.2	E1及びE2の中間程度である地震動(東海・東南海・南海地震の震度+0.4)
E1	東海・東南海・南海地震	5.8	堤防沈下は生じるが、堤内地の家屋倒壊は僅かである地震動

図3.3.2 想定震度分布 (左E2、中E1'、右E1)

表 3.3.4 設定した洪水流量

	想定する規模	流量
洪水規模1	現況流下能力規模	概ね 8,000m <sup>3</sup> /s
洪水規模2	現況流下能力を上回る規模	概ね 15,000m <sup>3</sup> /s

### 3.3.3 地震による被害の想定

地震被害、その後の復旧状況及び洪水被害の想定フローを図3.3.3に示す。このフローにより、地震により発生する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、人的被害を試算した結果を表3.3.5に示す。

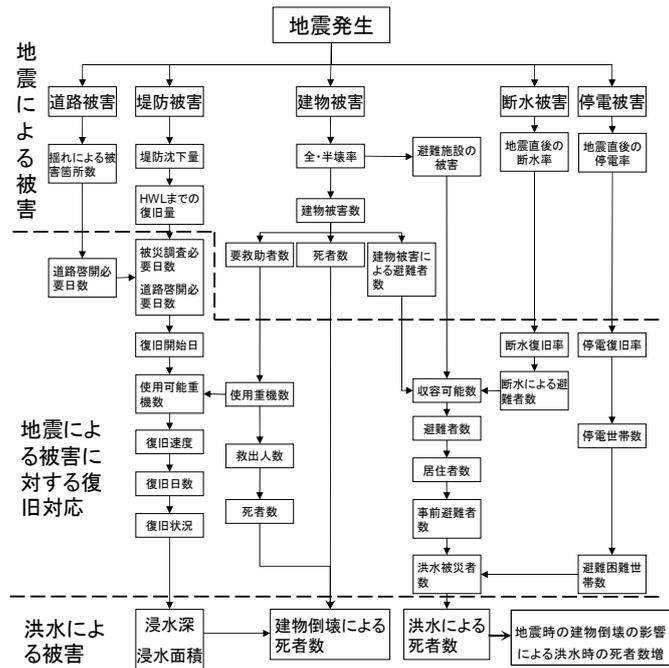


図 3.3.3 想定した地震の被害とその対応

表3.3.5 地震による被害試算結果

地震規模		E2	E1'	E1
モデル区域人口(人)		2,200,000		
モデル区域内世帯数(世帯)		780,000		
モデル区域内家屋数(戸)		580,000		
損壊家屋数(戸)	全壊家屋	57,000	21,000	420
	半壊家屋	220,000	120,000	1,800
	計	270,000	140,000	2,200
地震直後の停電世帯数(世帯)		730,000	680,000	360,000
家屋倒壊による人的被害(人)	死者	3,400	1,200	25
	要救助者	26,000	9,300	190
	救出人数	1,100	1,100	160
	救出時死者	25,000	8,300	30
地震による死者数(人)		28,000	9,500	55
地震直後の断水人口(人)*		1,700,000	1,700,000	1,200,000
家屋倒壊による避難者数(人)		240,000	84,000	1,500
断水による最大避難者数(人)		450,000	460,000	320,000
計(人)		690,000	550,000	320,000
避難所収容人数(人)	平常時収容可能人数	330,000		
	被災後収容可能人数	180,000	250,000	330,000
避難者数(人)	断水避難者ピーク時	区域内	180,000	250,000
		区域外	510,000	290,000
	断水解消後	区域内	180,000	84,000
		区域外	60,000	0
地震後自宅居住者(人)	断水避難者ピーク時	1,500,000	1,600,000	
	断水解消後	1,900,000	2,100,000	
地震による直接被害額(百億円)		2,600	1,700	19

\* 地震直後の断水人口は家屋倒壊による要救助者を除いた値。

### (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<sup>11)</sup>に基づき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、その後の経過日数に応じた復旧率を中央防災会議の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）<sup>12)</sup>を参考に想定（例 地震後1週間で復旧率90%）し、モデル区域内の停電世帯数（洪水時に避難行動をとれない人数）をメッシュ別に試算し洪水時避難率を低減した。今回停電率及び復旧日数を概略で設定したが、庄司ら<sup>13)</sup>、Shoji et al.<sup>14)</sup>がより詳細な設定手法を提案しており、今後同手法などを活用した精度向上が考えられる。

### (2) 道路啓開必要日数及び建物被害の推定

「中部版くしの歯作戦」<sup>15)</sup>を参考にE2地震時の道路啓開必要日数を3日と設定し、南海トラフ想定手法を用いてモデル区域内に想定した緊急輸送道路の「震度別延長(km)」に「震度別道路延長当たり被災箇所数(箇所/km)」を掛けることにより地震規模毎の道路被災箇所数を想定し、E2時の道路被災箇所数との比率によりE1'を3日、E1は2日と設定した。なお、今回道路被災箇所数を概略で設定したが、Shoji and Nakamura<sup>16)</sup>などを参考に最新の知見を活用した設定を今後検討することが考えられる。

また南海トラフ想定手法を用いて地震規模ごとの全・半壊戸数を設定するとともに、設定した家屋の全・半壊率よりモデル区域内の避難施設の被災(使用不能)率を設定した。

### (3) 地震による人的被害の推定

メッシュごとの震度、建物構造別・建築年次別棟数から南海トラフ想定手法を参考に全壊・半壊（全半壊戸数比より）戸数を試算し、死者・要救助者数（自立脱出困難者数）及び避難者数を試算した（表3.3.5、死者数がより多くなる夜間（建物滞留率100%）に地震が発生した場合を採用）。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<sup>17)</sup>を参考に発生当日:75%、2日目:25%、3日目:15%、4日目以降:0%と設定した。避難者数は南海トラフ想定手法を参考に建物倒壊と断水によるものに分けて推定した。断水による避難者数は川上による手法（水道管は普通鉄管とした）<sup>18)</sup>から設定した。水道復旧率については都市部における水道事業者の事業継続計画<sup>19)</sup>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（復旧率は復旧作業開始からの日数に一次比例）と想定した。断水による避難者数は断水生活困窮度に応じて時系列で変化し、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た。なお水道復旧に要する期間の設定についてはNagata et al.<sup>20)</sup>など、

ライフライン停止を踏まえた避難者数設定については東京都<sup>21)</sup>などを参考に今後改良することが考えられる。

#### (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の簡易式<sup>22)</sup>によって算定した200mごとの堤防沈下量を堤防耐震性能照査<sup>23)</sup>結果により補正（プレート型地震動による $K_h=0.4$ の場合の両沈下量の比から簡易式による沈下量を補正。堤防高の75%を沈下量の上限とした）し、地震規模ごとに堤防沈下量（右岸下流の山付き区間を除く）を設定した（図3.3.4）。左岸40kmより上流部において地震規模に応じた沈下量に若干差が生じているものの、それ以外の区間では顕著な差は認められなかった。

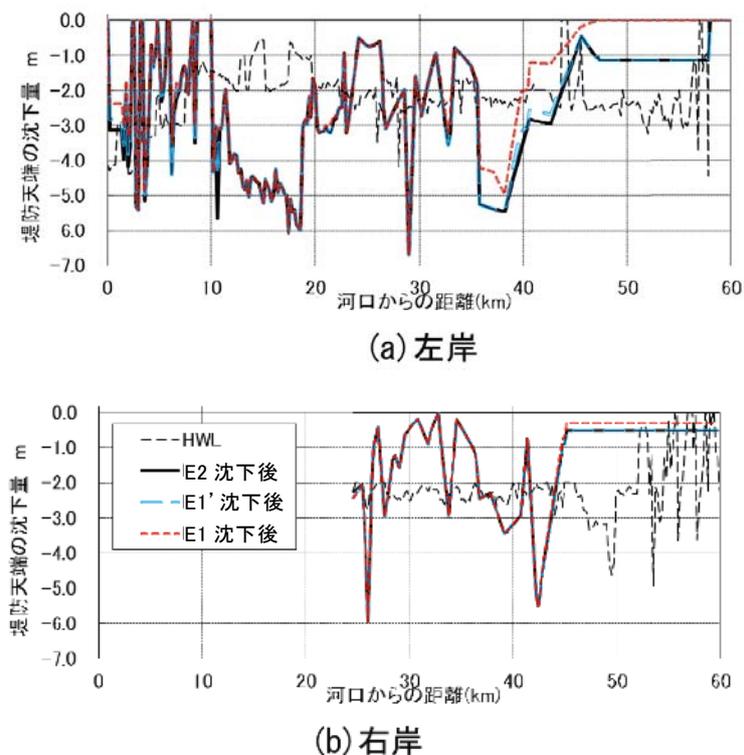


図3.3.4 堤防沈下状況設定縦断図

### 3. 3. 4 洪水発生までの危機対応の想定

#### (1) 危機対応で使用可能な重機数の設定

危機対応で使用可能な重機数は、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。このうち、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市町村内の協定業者まで対象を広げた。これら重機の救助作業と復旧工事での使用台数の割り振りについては東日本大震災における直轄管理河川

での緊急復旧工事の実績に基づき、バックホウ・ブルドーザは救助作業：復旧工事＝8：2、ダンプトラックは復旧工事開始後10日目までは同8：2、同11日目以降は3：7とした。なお、表-3.3.8に示す救助完了までに必要な日数が経過し、救助作業が完了した後はバックホウ・ブルドーザ・ダンプトラックともに同0：10とした（表3.3.6）。

表3.3.6 危機対応で使用可能な重機数の設定

消防機関 人員*1	救助作業 人員*2	救助隊編成		1名の救助に要する時間 <sup>24)</sup>		1日の作 業時間
				木造家屋	非木造家屋	
5,900人	4,500人	5人	バックホ ウ1台*3	117分	252分	9時間

(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表3.3.7のとおり設定した。本試算の救助隊数は結果的に重機数に制限された。1日あたりの救助可能人数等を表3.3.8に示す。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している。

表3.3.7 救助作業の設定

	救助 隊数	救助効率 (人/隊・日)		1日当 たり救 助可 能人 数	救助完了までに 必要な日数		
		木造	非木造		E2	E1'	E1
道路啓開前	228			933			
道路啓開後～ 緊急復旧工事開始前	447	4.6	2.1	1,832	23日	10日	1日
緊急復旧工事開始後	358			1,466			

- \*1 同規模の氾濫区域を持つ自治体の消防年報等から設定。
- \*2 救急隊員、通信指令要員等ほかの作業に従事する人員を考慮し消防機関人員の75%とした。
- \*3 東日本大震災の聞き取り調査より。

表3.3.8 倒壊建物からの救助作業の設定

	バックホウ		ブルドーザ		ダンプトラック	
	復旧工 事	協定業者 所有	復旧工 事	協定業者 所有	復旧工 事	協定業者 所有
道路啓開前	0	228	0	51	0	200
道路啓開後～ 河川堤防復旧工 事開始前	0	447	0	100	0	480
道路啓開後 復旧工事開始後 10日目まで	89	447	20	100	96	480
復旧工事開始後 11日目以降	89	447	20	100	336	480

### (3) 河川堤防の緊急復旧工事の設定

復旧工事は道路啓開後かつ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日間と設定した。緊急復旧工事は24時間体制で実施するものとし、復旧に必要な土量と1日当たりの復旧量等を表3.3.9に示す。地震規模による堤防被害に大きな差がないにも関わらず復旧工事完了までの日数に差が出たのは、堤内地における救助作業の影響を受け、復旧工事速度に差が生じたためである。

表3.3.9 河川堤防の緊急復旧工事の設定

地震規模	復旧土量(m <sup>3</sup> )	1日あたりの復旧量(m <sup>3</sup> )				地震発生から緊急復旧完了までの日数*
		10日目*迄	11~15日目	16~23日目	24日以降	
E2	1,438,085	16,000	16,000	21,000	80,000	37
E1'	1,379,007	16,000	80,000	80,000	80,000	27
E1	1,132,027	80,000	80,000	80,000	-	20

\* 堤防の被災調査に要する5日間を含む。

### 3.3.5 複合災害による被害の試算と被害特性の分析

氾濫計算は治水経済調査マニュアル(案)<sup>25)</sup>に基づき河道内水位を逐次一次元計算し、任意の堤防断面で無害流量に相当する水位(堤防沈下後は沈下分だけ低く設定、ただし耐震性能照査水位(耐震性能の照査において考慮する外水位)及び破堤敷高を下回らないものとした)を河道内水位が超えた時点で破堤氾濫するものとし、氾濫原内で250mメッシュ二次元不定流計算によりメッシュ別最大浸水深を試算した。

洪水による直接被害額は次式によりメッシュ・資産種類ごとに試算した。

$$\text{「直接被害額」} = \text{「最大浸水深} \cdot \text{資産種類に応じた被害率」} \times (\text{「地震前の資産額」} - \text{「地震による資産被害額」})$$

表3.3.10 洪水時の死者数算定条件

地震による要救助者の浸水時の死亡判定	避難率は0%とし、1階床面から危険水位帯として判定
半壊家屋居住者の浸水時の死亡判定	年齢に関わらず上階へ避難ができないものとし、1階床上から安全水位帯、準危険水位帯、危険水位帯として判定
洪水時の避難行動	地震による避難者の洪水時避難率は100%、自宅残留者の避難率は40%、停電世帯の避難率は0%と設定

洪水による死者数は浸水深に応じて死亡率を設定するLIFESimモデルを参考にした手法<sup>26)</sup>を踏まえ表3.3.10及び図3.3.5のとおり地震の影響を考慮した算定条件を設定し、次のとおりメッシュごとに試算した。

「死者数」＝「最大浸水深・建物損壊状況（全・半壊、その他）に応じた死亡率」×  
（「建物損壊状況別居住者数（避難者及び地震による死亡者を除く）」

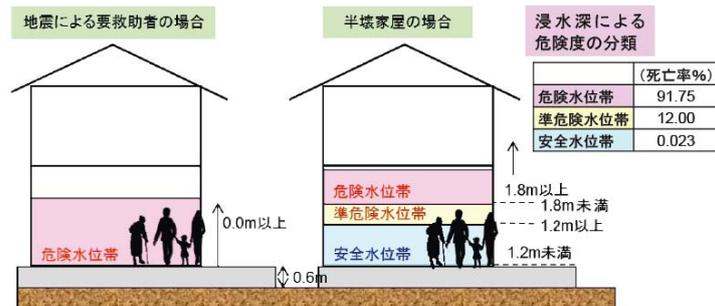


図3.3.5 地震による被害を考慮した洪水時死亡率の設定

(1) 洪水氾濫計算結果

洪水氾濫計算結果例を図3.3.6に示す。洪水規模2について洪水単独の場合と堤防が最も沈下した状況であるE2地震直後の場合とを比較すると、後者は前者に比べ平均浸水深で約1.3倍、浸水面積で約1.5倍に増大し、堤防沈下の影響が明確に表れた。なお、地震規模ごとの堤防沈下量の差は小さかったため地震規模による浸水深・面積の差は顕著ではなかった。

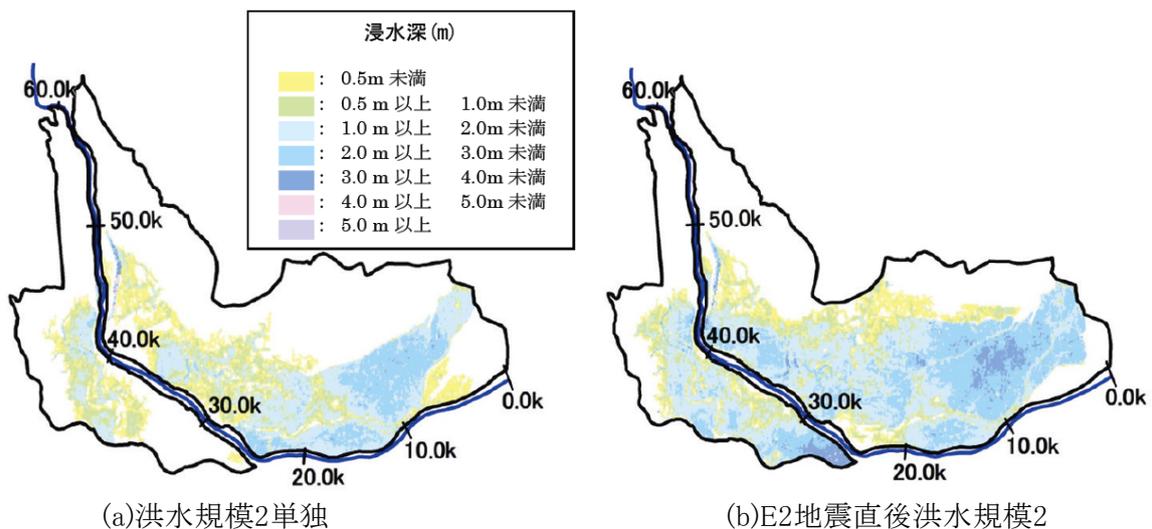


図3.3.6 氾濫シミュレーション結果

## (2) 洪水被害の試算と被害特性の分析

図3.3.7に地震発生から洪水発生までの日数とモデル区域内の居住者（避難せず自宅にいる住民）、堤防の復旧速度、洪水による死者数の関係を示す。洪水が単独で発生した場合の被害（洪水規模2で460人、洪水規模1で0人）と比較すると、複合化することで洪水被害が大きく増加している。

なお、1)で述べたとおり地震規模による氾濫状況に大きな差はないにも関わらず、E2とE1'地震後の洪水規模2による死者数に大きな差が生じている（地震直後の洪水でE2はE1'の約1.4倍）。これは表3.3.5に示したとおり全・半壊戸数でE2はE1'のほぼ2倍となっていることから建物被害の影響（地震による建物倒壊により要救助者の死亡率が増大すること、半壊建物における死亡率が上昇すること等）が大きいと推察される。

特に地震直後に洪水規模2が発生すると洪水による死者数は、表3.3.5に示した地震単独による死者数よりも大きくなる。一方、堤防の復旧が進むにつれて死者数は大きく減少し、復旧工事の進捗が被害低減に大きく寄与することがわかる。ただし、E2、E1'地震のいずれも20%復旧時よりも50%復旧時の方が洪水規模1、2による死者数が多くなった。これは、地震に伴う断水による避難者が、断水の解消とともに区域内の住居に戻ってきた結果、20%復旧時よりも50%復旧時の方が区域内人口が多くなったためである。

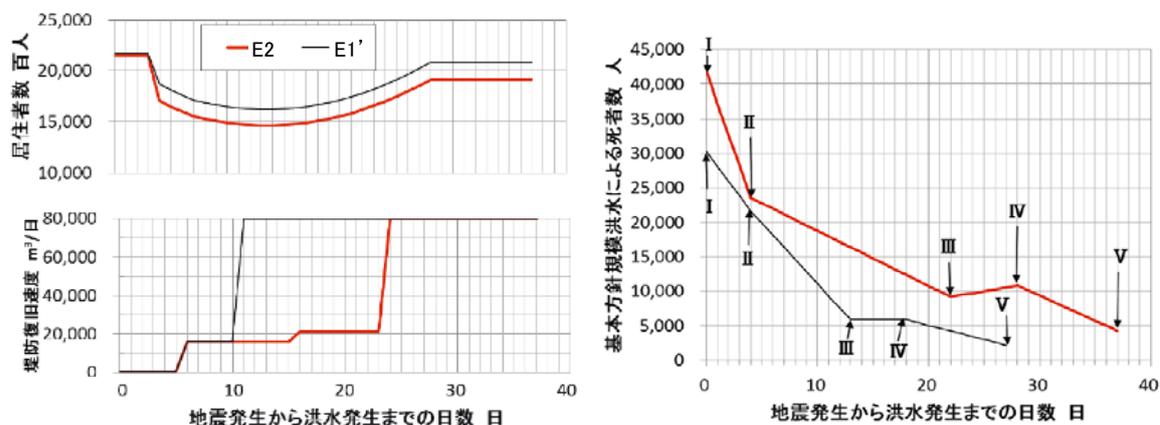


図3.3.7 地震から洪水までの日数と洪水規模2による死者数等との関係

### 3.3.6 複合災害時の被害低減対策の効果の試算・分析

下記4つの仮想的対策ケースを設定し、各被害低減効果を試算した。試算結果の比較・分析に当たっては、地震発生日から洪水発生日までの日数と洪水による被害との関係曲線（図3.3.7参照）を作成するとともに、同曲線と横軸との間に挟まれる面積（地震発生日から緊急復旧完了日まで）を「相対リスク」として次のとおり定義した。

相対リスク =  $\int R(t) dt$  (積分区間は $t=0$ から $t_e$ まで)

ここで、 $R$ は死者数または洪水による直接被害額、 $t$ は地震発生から洪水発生までの日数、 $t_e$ は河川堤防の緊急復旧工事完了までに要する日数

$R(t)$ は地震発生から洪水発生までの日数と洪水による被害との関係曲線を表し、これを日で積分した相対リスクは、後に示す図3.3.8、図3.3.9、図3.4.1、図3.4.2において、 $R(t)$ 曲線と縦軸及び横軸に囲まれた部分の面積である。この値は、地震発生後の1日あたりの洪水の発生確率が一定であれば、地震後、河川堤防の緊急復旧工事完了までに発生する洪水被害の期待値に比例する。上記相対リスクに基づき「被害低減対策ごとの被害低減率」= (「対策なしの場合の相対リスク」 - 「対策実施の場合の相対リスク」) ÷ 「対策なしの場合の相対リスク」) について分析した。

本項で、対策ケースは以下の4ケースを対象とした。

- 対策ケース1：河川堤防の緊急復旧を2週間で100%実施できる資機材（建設重機、堤防材料等）を備蓄しておく。
- 対策ケース2：同2週間で50%実施できる資機材を備蓄しておく。
- 対策ケース3：上記対策ケース2と同程度の費用（50年間）で堤防を耐震化する。
- 対策ケース4：上記対策ケース3と同様に堤防を耐震化するとともに「対策ケース1の費用と対策ケース3の費用の差」（50年間分）を上限として資機材の備蓄を行う。（堤防の耐震化費用と資機材の備蓄費用（50年間分）の合計は対策ケース1と同程度）

#### (1) 地震の影響による洪水被害の変化

地震による河川管理施設、氾濫ブロック内の建物・道路等の被害は、その後発生する洪水被害に対して主に次の3つの影響を与えられられる。

- ① 堤防の沈下による洪水時の氾濫範囲・浸水深の増大による被害の増大。
- ② 氾濫ブロック内の住宅等が地震により損壊し、2階建て建物において2階へ避難できなくなること、地震後の停電により洪水時の避難情報等が伝達できなくなる等による洪水時の人的被害の増大。
- ③ 地震で建物等が損壊することによる資産の残存価値の低減に起因した、その後の洪水氾濫による浸水時の直接被害額の見かけ上の低減。

E2、E1' 地震後に洪水規模2又は1が表3.3.2の各時点（Ⅲを除く）で生じた場合の洪水による死者数の試算結果を図3.3.8に、同洪水規模2が生じた場合の洪

水による直接被害額の試算結果を図3.3.9に示す。図3.3.8のとおり地震規模の増大に応じて洪水による死者数が増大している。これは、上述のa、bの影響が相対的に大きいためと考えられる。一方、図3.3.9の地震直後の洪水による直接被害額は地震規模の増大に対して減少している。これは上述のcの影響が相対的に大きくなったためと考えられる。

#### (2) 資機材備蓄対策と耐震化対策による効果の違い

今回の試算上同程度の費用となる対策ケース2と3を比較すると、当然のことながら堤防の耐震化対策による洪水被害低減効果は地震発生直後から生じ、地震発生直後の洪水被害に大きな差が生じている（図3.3.8）。また、被害低減率を比較すると、例えばE2地震後の洪水規模2による死者数では、対策ケース2では46%であるのに対して、対策ケース3では72%と20ポイント以上大きくなった。複合災害時の被害低減対策について「耐震化対策による被害低減効果は備蓄対策よりも大きい」ことを本手法により確認することは、代替案の比較検討時に重要な場合があるものと考えられる。

#### (3) 想定洪水規模の違いが被害低減効果に及ぼす影響

対策による被害低減効果は洪水規模により異なっている。例えば、図3.3.8の対策ケース3、4による死者数低減効果は一部の時点を除き現況流下能力規模洪水時よりも基本方針規模洪水時の方が大きい。被害低減率を比較すると、例えば対策ケース3におけるE1'地震後の洪水規模2による死者数では72%だが、同洪水規模1については60%と10ポイント以上の差が生じた。複合災害に関する被害低減対策の比較検討時には、複数の洪水規模を対象として被害低減効果を試算することが必要な場合があると考えられる。

#### (4) 想定地震規模の違いが被害低減効果に及ぼす影響

地震規模により対策ケースごとの被害低減効果が異なっている。例えば、対策ケース2における洪水規模2による死者数の被害低減率は、E2地震について46%であるが、同E1'地震については21%しかない（図3.3.8）。これは、E2地震時に比べE1'地震時の氾濫ブロック内の家屋被害が相対的に少ない（表3.3.5）ことなどから、資材備蓄による復旧作業の早期化による被害低減効果が相対的に小さくなったためと考えられる。複合災害時の被害低減対策の比較検討時には、複数の規模の地震を対象に被害試算を行うことが必要な場合があると考えられる。



### 3. 3. 7 得られた知見

以上の検討から得られた主な知見は次のとおりである。

- ① 地震・洪水規模の変化が洪水被害に与える影響を死者数と直接被害額の2つの観点から図示した。洪水時の死者数は地震規模の増大により増加したが、同直接被害額は地震規模の増大により見掛け上、減少する場合があった。このため、複合災害対策の検討においては特性の異なる複数の被害指標の観点が重要と考えられる。
- ② 資機材備蓄対策と堤防等の耐震化対策の被害低減効果の特性を図示した。耐震化対策による被害低減効果は地震直後に大きいとともに、緊急復旧完了までの期間全体で見ても相対的に大きいことを示した。迅速な復旧が困難な地域特性等が認められる場合には特に耐震対策の優先順位を上げる必要性が高いと考えられる。
- ③ 想定地震・洪水規模の違いにより対策ごとの被害低減効果が異なることを図示した。特定の地震・洪水規模に対策の検討・分析を限定せずに、複数の地震・洪水規模を対象に被害試算・対策検討を行うことが重要と考えられる。

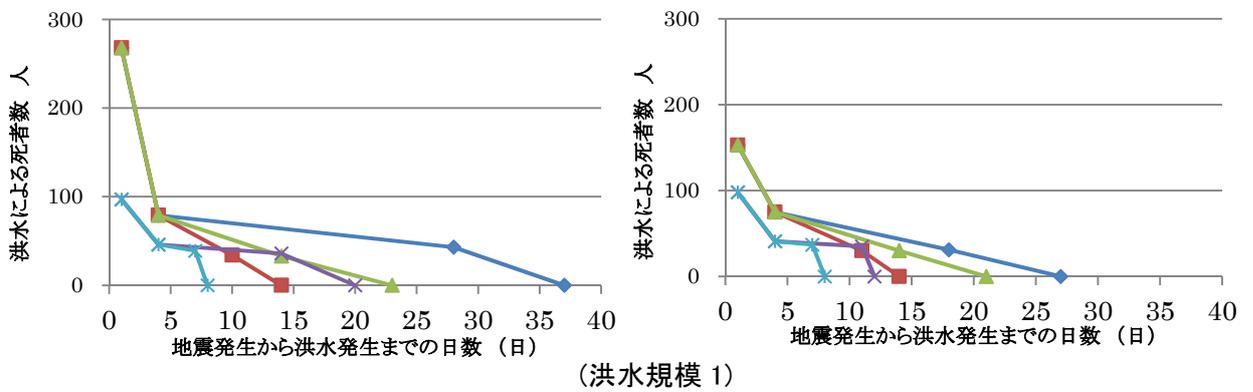
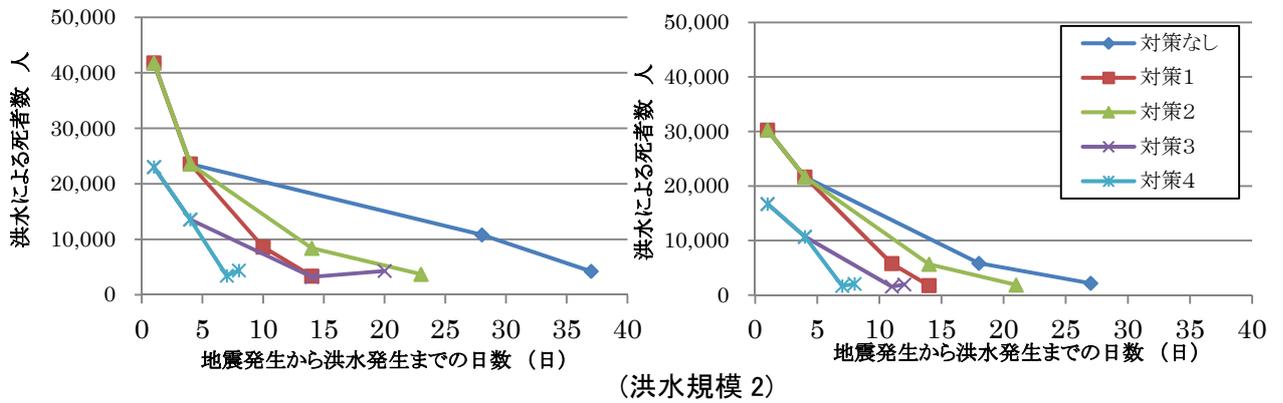


図 3.3.8 被害低減対策ごとの死者数低減効果 (左 E2 地震 右 : E1' 地震)

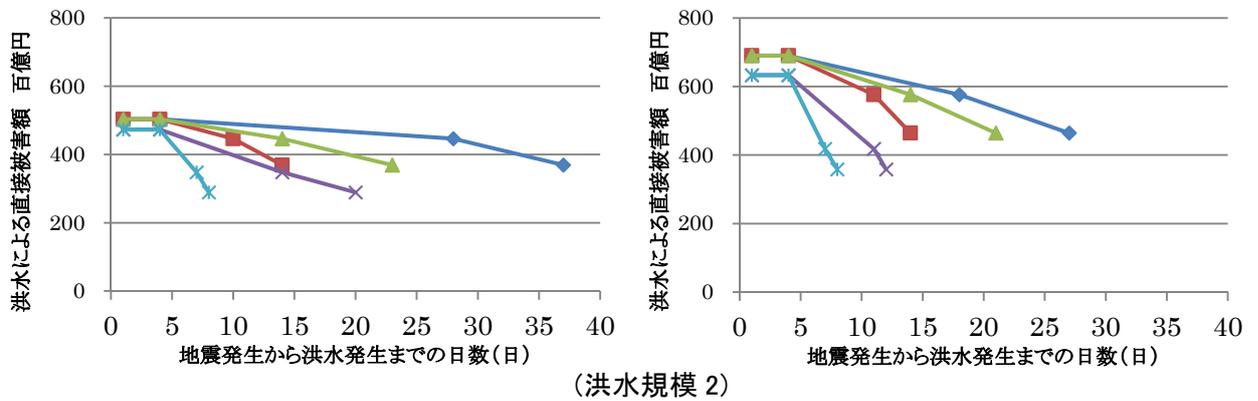


図 3.3.9 被害低減対策ごとの直接被害額低減効果 (左 E2 地震 右 : E1' 地震)

### 3. 4 堤内地での対策を含む様々な被害低減対策による効果の特性の分析

#### 3. 4. 1 分析にあたっての基本的な考え方

河川整備を対象とした対策だけでなく、図 3. 3. 3 を参考に相互に関連すると考えられる河川以外の分野の対策も加え、より幅広い被害低減対策による複合災害時の被害低減特性についてさらに分析を行った。ここで、対策としては各単独災害を想定した対策を設定した。これは複合災害に特化した対策を実施することは整備労力の観点から制約があり難しいと考えたためである。現実的に実施される可能性のある単独災害を想定した対策に対して複合災害時の外力を作用させることにより、その際の被害低減効果を分析したものであり、一種のストレステストと言い換えてもよいだろう。

#### 3. 4. 2 検討方法及び対象とした外力・対策

対象としたモデル河川や外力、被害試算の算定手法については、3. 3 と同様の設定とした。なお、地震後の洪水の発生時点については表 3. 4. 1 のとおり拡充した。

表3. 4. 1 設定した地震と洪水の生起間隔

発生 タイミング	洪水発生時	道路啓開	地震による 避難率
I	地震発生直後	実施前	0%
II	地震発生直後	実施前	40%
III	地震発生直後	実施後	100%
IV	堤防復旧10%時点	実施後	100%
V	堤防復旧20%時点	実施後	100%
VI	堤防復旧50%時点	実施後	100%
VII	堤防復旧100%時点	実施後	100%

各種対策は、3. 3. 6 の検討を踏まえ、改めて以下の通り、想定した。

#### ① 対策 0：現況（無対策時）

対策の効果을把握するため無対策の状況を設定した。

#### ② 対策 1：流下能力向上

モデル河川では暫定堤区間を設定しており、これらを完成堤まで整備すると地震による沈下後の堤防高が対策 0 よりも確保され、復旧に要する期間及び氾濫流量も減ずることが想定される。そこで下流部の暫定堤区間を完成堤として整備する対策を設定した。

#### ③ 対策 2：堤防の沈下対策

地震による堤防の沈下を抑制することにより、地震後の洪水による氾濫被害を抑制することができることに加え、復旧に要する資材の量も削減されることが考え、下流部の堤防に対する沈下対策を選定した。なお、沈下対策を行った区

間は地震後も沈下が生じないものと設定した。

④ 対策 3：避難者の帰宅規制・誘導

地震時の一時避難者が断水復旧状況に応じて氾濫区域内の自宅に帰宅することで、洪水による人的被害が拡大する可能性がある。そこで、一度避難した人の帰宅を規制することで、洪水による人的被害の拡大を抑制するため、本対応を選定した。

⑤ 対策 4：緊急復旧資機材の備蓄拡充

堤防の復旧速度は、復旧用資機材の量やそれを運搬するルート確保等によっても左右される。また、資機材の備蓄がない条件では、重機は救助活動に優先され、救助活動終了後に堤防復旧工事に用いられることとなる。よって、事前に資機材の備蓄を拡充し、上記に左右されない体制を予め整えておくことで、堤防の復旧速度を早めることができると考え、本対策を選定した。

⑥ 対策 5：二線堤

洪水による浸水範囲を抑制することにより、被害を低減することができると考え、洪水被害が発生する区間の既存道路の一部を嵩上げ、二線堤とする設定とした。

⑦ 対策 6：堤内地の建物の耐震化

地震によって倒壊する建物を要因とする人的被害と要救助者の救出に要する重機の使用日数を低減させるため、耐震基準が改訂された 1981 年以前に建築された建物について、新耐震基準と同程度の耐震性を有する水準の耐震補強を実施するものと設定した。

⑧ 対策 7：道路啓開のための対策

地震発生後の救助・救援ルートを確保し、道路啓開に要する時間を短縮することで、堤防復旧に使用する機材を早期に割り当てることができると想定した。そこで、「避難道路沿線の建物の耐震化」と「電柱・電線の地中化」を道路啓開の早期解決の対策として設定した。

### 3. 4. 3 氾濫計算及び洪水による被害の試算結果

洪水による人的被害の結果の一例を図 3. 4. 1 に示す。人的被害については地震直後に洪水が発生した場合の対策 0 の条件下の被害を 1 として無次元化している。また、グラフ内で示されている対策毎のマーカーは、左から順に、表 3. 4. 1 で示した洪水発生タイミングを示している。

#### (1) 単独災害を想定した対策の複合災害に対する効果

地震規模 E2、洪水規模 2 の条件下での洪水による人的被害は、程度の差はあるものの、いずれの生起間隔においても全ての対策ケースにおいて減少しており、地震規模 E1'、E1 においても同様の傾向が確認された。これは、地震や洪水の単

独発生時を想定して実施する対策が、複合災害時にも効果を発揮することを示すものである。また、対策によって被害の低減効果が顕著となる時期が異なり、地震直後の洪水に対する低減効果が高い対策と地震発生から洪水発生までの期間が長くなるに伴って低減効果が高くなる対策に傾向が分かれる。前者については、堤防の沈下量を抑制するといった洪水に対する直接的な対策が該当する傾向にある。一方で、後者は、堤防の復旧期間の短縮によって効果が発揮される対策が該当する傾向にある。

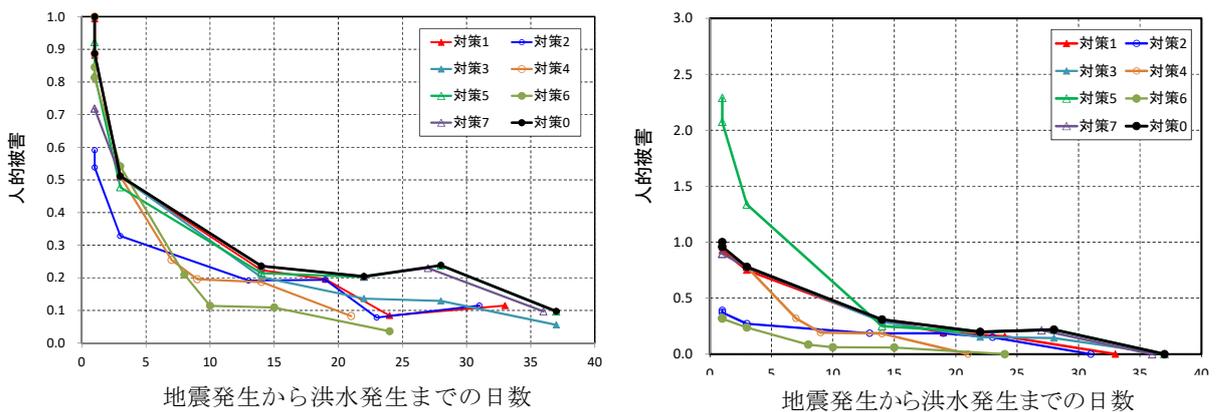


図 3.4.1 地震発生から洪水発生までの日数と人的被害との関係

(左図：地震：E2 規模，洪水：洪水規模 2，右図：地震：E2 規模，洪水：洪水規模 1)

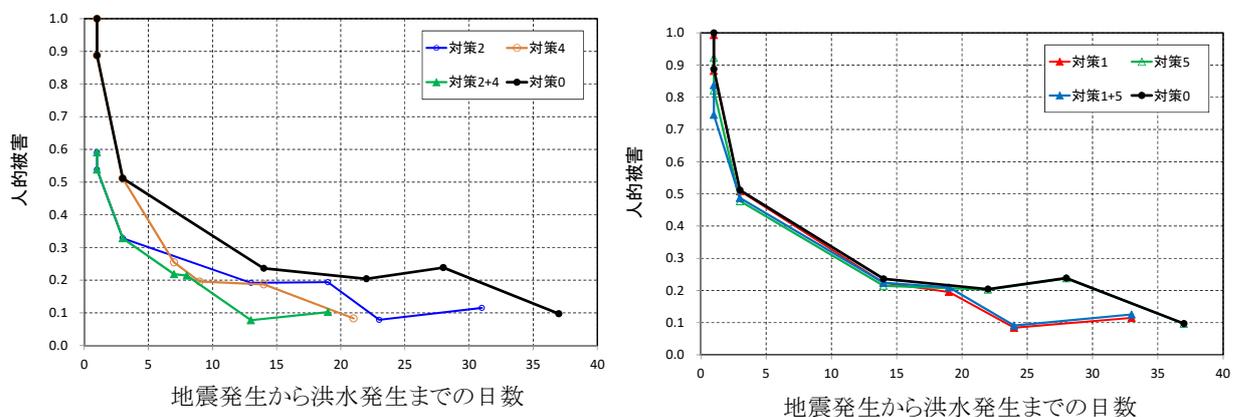


図3.4.2 地震発生から洪水発生までの日数と人的被害との関係

(地震：E2規模，洪水：洪水規模2)

(2) 想定した対策効果とその付加効果

対策 6 は、洪水に対する直接的な対策ではないが、洪水に対する人的被害の低減効果が確認された。これは、家屋の倒壊が抑制され、家屋からの救助活動に要する労力が減少し、堤防復旧工事へ投入可能な重機が増えたことによる。その結

果、堤防の復旧工事の日数が短縮され、洪水による人的被害が低減したと推測される。これは、本来の効果に加えて、意図していない効果を発揮し、複合災害時の被害低減に寄与する可能性があることを示すものである。一方で、対策 5 では、洪水規模 2 の条件下では被害が低減しているものの、洪水規模 1 の条件下では、地震発生直後の洪水において、無対策時に比べて人的被害が 2.3 倍に増加している。地震発生から約 14 日後に発生する洪水にてその被害は無対策を下回るが、上記までの期間は総じて無対策時よりも被害が大きくなっていることが確認できる。この要因として、今回の試算においては、対策 5 により二線堤と河川間の浸水深が大きくなったことが挙げられる。場合によっては、二線堤の対策により浸水範囲は狭まるものの、その範囲の浸水深は無対策時と比べて大きくなる。その結果、浸水深の増大による人的被害の増加分が、二線堤によって非浸水域や浸水深が低下する範囲の人的被害を上回り、被害が増加したと考えられる。また、堤防の復旧に伴い氾濫流量が減るため、堤防復旧が 10%となる 14 日後の条件下においては、上記で示した浸水深が増減する範囲の人的被害数が逆転し、無対策時よりも被害が低減したと推測される。このように、対策によっては本来想定していた効果に加えて意図していない効果も発揮され、被害を低減させる効果と増加させる効果の両面を有する可能性があることを認識しておく必要がある。

### (3) 各対策の組み合わせによる効果

図 3.4.2 は各種対策を組み合わせた際の人的被害の一例を示したものである。対策 2 及び 4 を設定することによって、各対策単独時よりも被害低減効果を発揮しているとともに、その効果は各対策を単純に足し合わせた結果とは異なることが確認できる。一方、対策 1 及び 5 を設定した条件下では、対策単独の場合と複数の対策を組み合わせた場合において効果はほぼ変わらない。また、洪水発生の時期によっては、組み合わせた場合の方が、被害が大きくなる場合があることも確認された。今回の試算のケースでは、被害の増加は、二線堤よりも上流部で生じた氾濫によって、二線堤と河川間に氾濫水が集中し、浸水域あるいは浸水深が増加する範囲が拡大したためである。上記範囲における人的被害の増加分が、二線堤により非浸水域となる範囲の人的被害の減少分を上回ったため被害が増加したものと考えられる。これは、二線堤による対策が一律に被害を拡大するというのではなく、各種対策の特性を把握した上で、対策の組み合わせを検討する必要があることを示唆している。

#### 3. 4. 4 得られた成果

- ① 地震対策及び洪水対策を仮定した氾濫計算において、複合災害時においても人的被害が低減する結果が多くの条件で確認された。単独災害時を想定して実施する対策が複合災害時にも被害低減効果を発揮することが示唆された。
- ② 建物の耐震化によって家屋倒壊が減少し、同家屋からの救助活動負荷が減ることにより、堤防復旧工事に使用可能な重機が増え、河川堤防の復旧期間が短縮される等、対策によっては、本来想定していた効果に加えて意図していなかった効果が発揮され、被害の増減に影響することが示唆された。
- ③ 対策の組み合わせによって、その効果が重複することにより、より大きな低減効果を発揮する可能性があることが示唆された。
- ④ 対策によっては被害が大きくなる場合がありうることから、対策を検討するにあたっては、対策の特性を十分に把握する必要があることが示唆された。

#### 3. 4. 5 まとめ

本研究では、地震と洪水の過去の発生状況等を踏まえ、複雑な複合災害の発生メカニズムを単純化した上で、複合災害時の被害特性の体系的分析手法を提案した。具体的には、災害の規模・発生間隔を限定的ではあるものの体系的に変化させることにより地域特性を踏まえつつ被害発生特性及び各種被害低減対策による被害低減特性を把握・表示するものである。同手法をモデル河川に適用し、地震後に洪水が生起する複合災害を対象として死者数及び直接被害額の被害特性及び各種被害低減対策による被害低減効果について分析し、対策検討上の留意事項を抽出した。

現状において複合災害に特化した対策の検討・実施は費用対効果の観点から一般的とは言い難い場合が少なくないものと考えられるが、近年指摘される気候変動の影響等を踏まえると、本手法を用いて災害発生メカニズム、被害発生に係る地域特性を災害発生前に把握・理解しておくことは、若手職員の災害対応能力向上等の観点からも重要と考えられる。

## 参照文献

- 1) 中央防災会議:大規模地震防災・減災対策大綱(案), 2014.
- 2) 中央防災会議:防災基本計画, 2014.
- 3) 国土交通省:社会資本整備重点計画(素案), 2012.
- 4) 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 年 3 月.
- 5) 河田恵昭:自然災害の新しい脅威と災害対応の課題、減災, Vol. 3, 2008 年 5 月, pp. 14-20.
- 6) 松浦達郎・板垣修・服部敦: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, 河川技術論文集, 第 20 巻, 2014 年 6 月, pp. 385-390.
- 7) 板垣修・松浦達郎・服部敦:地震と洪水の複合災害に係る被害低減対策効果の特性の分析, 第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集, 2014 年 12 月.
- 8) 福原直樹・板垣修・松浦達郎・服部敦:地震と洪水の複合災害対策による被害低減効果の検討, 河川技術論文集, 第 21 巻, 2015 年 6 月, pp. 449-454.
- 9) 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 年 5 月.
- 10) 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 年 9 月.
- 11) 消防庁:東日本大震災記録集, 2013 年 3 月.
- 12) 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 年 3 月.
- 13) 庄司学、高橋大、築地拓哉、那波悟志:2011 年東北地方太平洋沖地震における 1 都 5 県の停電分析, 土木学会論文集 A1, Vol. 68, No. 4, 2012 年 7 月, pp. I 1210-I 1223.
- 14) Gaku Shoji and Ayumi Toyota: Function of emergency road networks during the post-earthquake process of lifeline systems restoration, Journal of Disaster Research, Vol. 7, No. 2, 2012 年 2 月, pp. 173-183.
- 15) 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 年 5 月.
- 16) Gaku Shoji and Tomoharu Nakamura: Development of damage functions on road infrastructures subjected to extreme ground excitations by analyzing damage in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Journal of Disaster Research, Vol. 9, No. 2, 2014 年 3 月, pp. 121-127.
- 17) 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 年 1 月.
- 18) 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 年 10 月, pp. 646-647.
- 19) 名古屋市上下水道局:事業継続計画地震対策編, 2012 年 3 月.
- 20) Shigeru Nagata, Kohei Kageyama, Kinya Yamamoto: An emergency restoration

model for water supply network damage due to earthquakes, Journal of Disaster Research, Vol. 3, No. 6, 2008年12月, pp. 390-399.

- 21) 東京都防災会議:首都直下地震等による東京の被害想定報告書, 2012年4月, pp. 3-67, 3-70.
- 22) 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, 17頁, 2012年2月.
- 23) 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能照査指針・解説, 2012年2月.
- 24) 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, 2004年3月.
- 25) 国土交通省河川局:治水経済調査マニュアル(案), 2005年4月.
- 26) 国土交通省水管理・国土保全局:水害の被害指標分析の手引(H25 試行版), 2013年7月, pp. 23-25
- 27) 中部地方幹線道路協議会 道路管理防災・震災対策検討分科会:中部版くしの歯作戦 2014.