

地震と洪水の複合災害対策による 被害低減効果の検討

DAMAGE REDUCTION EFFECTS OF COUNTERMEASURES TO MULTIPLE DISASTERS BY EARTHQUAKES AND FLOODS

福原直樹¹・板垣修²・松浦達郎³・服部敦⁴

Naoki FUKUHARA, Osamu ITAGAKI, Tatsuro MATSUURA and Atsushi HATTORI

¹正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 企画部 国際研究推進室
(元 河川研究部 河川研究室) (茨城大学大学院 環境機能科学専攻)
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 工修 国土交通省 大臣官房付 (元 河川研究部 河川研究室)
(〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

³非会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部下水道研究室
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

⁴正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 (同上)

The damage reduction effects of countermeasures to multiple disasters by earthquake and flood was simulated using flood simulation and the other existing results. The simulation was carried out to evaluate the effect of the countermeasures for earthquake or flood considering flood occurs soon after an earthquake.

The results of the simulation indicate that the most of countermeasures for earthquake and flood showed damage reduction effect under multiple disasters, such as the countermeasure for earthquake worked to reduce the damage of flood, and vice versa. However, setback levees showed damage increase effect under some cases of multiple disasters.

Key Words : multiple disaster, disaster control, damage reduction effect

1. はじめに

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、低頻度あるいは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¹⁾²⁾³⁾。

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。

松浦ら⁴⁾は、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ている。

本論文は、この指摘を受けて、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ものである。具体には、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。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

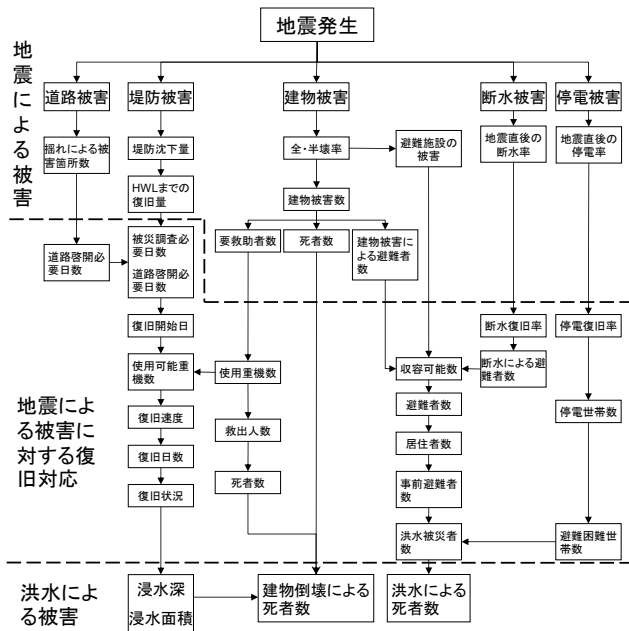


図-1 想定した地震の被害とその対応⁴⁾に加工

について抽出したものである。

2. 対策検討にあたっての基本的な考え方

地震発生によって河川構造物や堤内地の家屋に被害が生じる。その復旧速度は、被害の大きさや資機材等の確保状況によって異なるが、復旧途中において洪水が発生した場合は、洪水単体で発生した際の被害と比べて大きくなる場合があると考えられる。そのため、その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、既往研究で示された詳細な被害及びその対応相関フロー⁴⁾（図-1）をベースとし、それらを「地震による被害」「地震による被害に対する復旧対応」「洪水による被害」の3つに大別して、検討を行った。これにより、例えば建物被害による要救助者の救出や道路啓開日数が堤防の復旧日数にも影響するといった実際の現場対応の状況を試算に反映することができる。

また、対策は、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算定したものであり、一種のストレステストと言い換えてもよいだろう。また、その対策は河川整備を対象とした対策だけではなく、図-1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選定に加えた。

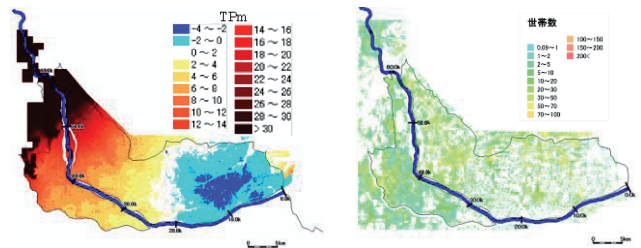


図-2 モデル河川氾濫区域内の地盤高及び世帯数

表-1 設定した地震と洪水の生起間隔

発生タイミング	洪水の発生時期	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%

表-2 モデル河川の基本諸元

項目	諸元
流域	幹川流路延長 約200km (直轄管理区間: 約60km)
	流域面積 約5,000km ²
河道	河床勾配 1/500~1/5,000
流域の状況	人口: 約2,200,000人 世帯数: 約775,000世帯 家屋戸数: 約570,000戸 総資産: 約68.6兆円

3. 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、既往文献⁴⁾と同様の設定とした。以下にその詳細を記載する。

(1) 被害試算の手順

検討は、地震後に洪水が発生するとの仮定にて行った。地震による被害は、既往研究等の結果の適用を基本としたが、結果が確認できないものについては過去の実績等を調査して想定した。その後、地震による被災者の救出や被災した河川構造物、瓦礫等にて閉塞している道路等の復旧作業の進捗状況を想定した。その救出・復旧作業の進捗状況の各段階において洪水が発生した場合を考え、地震発生からの日数を変化させた時点で氾濫計算を実施した。地震と洪水の生起間隔について表-1に示す。なお、本稿においては地震発生日を1日目として整理している。ここで示す堤防復旧率は、地震による被害から算定した河川堤防の緊急復旧（計画高水位（HWL）高さを天端高とする堤防復旧）の必要土量に対する復旧済み土量の割合を示しており、復旧段階の堤防高は、各段階における土量から算定して設定した。

表-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
L2	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
L1'	L1及びL2の中間	6.2	L1及びL2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)
L1	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

また、被害の規模の試算にあたり、対象とした堤内地の範囲をメッシュに区分し、各メッシュに対して被害の指標となる人口及び資産を設定した。その後、各メッシュに対して地震動を与えてメッシュ毎の被害を算出し、それらを足し合わせることで、地震時の全体の被害を算出した。また、洪水時の被害についても同様にメッシュ毎に被害を算定する方法にて試算した。

(2) 計算条件の設定

a) モデル河川

本検討は、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た。モデル河川の諸元を表-2に、モデル河川の氾濫区域における地盤高及び世帯数の分布を図-2に示す。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。

b) 外力

地震による河川構造物や堤内地（人的被害、建物）の被害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）。南海トラフの巨大地震⁵⁾及び東海・東南海・南海地震⁶⁾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。

洪水は、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8,000m³/s、洪水規模2で概ね15,000m³/sとした。

(3) 各種対策

a) 対策0：現況（無対策時）

対策の効果を把握するため、無対策の状況を設定した。現況の堤防縦断面図を図-3に示す。

b) 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選定した。

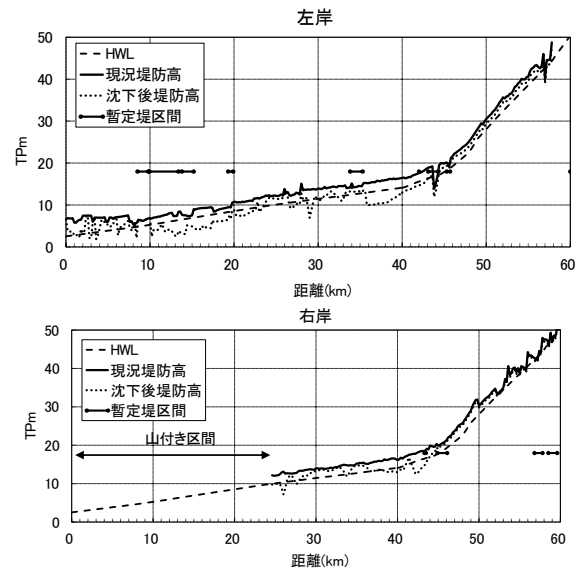


図-3 モデル河川の堤防縦断面図

c) 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と考え、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。

d) 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場合がある⁴⁾。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。

e) 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の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。

f) 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、二線堤とすることを選定した。

g) 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対策を選定した。

h) 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選定した。

4. 地震による被害

地震による被害想定については、南海トラフ巨大地震を対象として検討された結果⁷⁾を用いた。ただし、上記で検討されていない被害（堤防の沈下量等）については、別途に試算した。

(1) 堤防の沈下

堤防の耐震性能照査指針⁸⁾に基づいて設定した。数値解析結果が確認できる断面については、その沈下量を用いた。数値解析結果は確認できないものの、柱状図は確認できる断面については、簡易推定式を用いて沈下量を算出した後、係数を用いて補正を行った。補正を行った理由としては、簡易推定式による沈下量が数値解析と比して過大に評価される傾向があったことによる。補正係数は「数値解析による沈下量/簡易推定式による沈下量」と定義し、数値解析結果と柱状図の双方が確認できる断面毎に算出した。その後、対象とする上下流の補正係数を内挿することで、各断面の補正係数を決定した。柱状図が確認できない断面においては、上記方法を用いて算出された上下流の沈下量の内挿することで設定した。図-3に沈下後の堤防高の情報を付記する。

(2) 停電被害

東日本大震災での実績⁹⁾を基に、震度に対する停電率を、震度4：13%、震度5弱：22%、震度5強：43%、震度6弱以上：96%と設定し、電力は徐々に復旧するものと設定した。なお、停電世帯については、洪水時の避難放送等の情報が入手困難と考え、洪水時に避難行動をとれないものとした。

(3) 建物被害

震度に応じた構造別・建築年代別の建物被害率曲線⁷⁾から震度分布に対する全壊棟数を算出した。被害率曲線を適用して家屋の全壊率をメッシュ毎に算出した後、メッシュ内の戸数に乗じることで全壊戸数を算定した。半壊戸数は建築年代別の全壊と半壊・大規模半壊の比率を用いて算出した。なお、算定は木造、非木造別に実施した。

(4) 断水被害

断水時には日常生活が困難になるとの想定から、断水人口を算定した。断水人口は、メッシュ人口から死者、要救助者、家屋倒壊による避難者を除いた人口に断水率曲線¹⁰⁾を用いて設定した断水率を乗じることで算定した。

表-4 設定した重機数

	バックホウ (台)	ダンプ トラック(台)	ブルドーザー (台)
氾濫域内の重機数	228	200	51
氾濫域を含む 自治体内の重機数	447	480	100

表-5 重機の稼働率

地震動ケース	期間	重機の稼働率		
		バックホウ (台)	ダンプ トラック(台)	ブルドーザー (台)
L1	全期間	100%	100%	100%
L1', L2	初期10日間	20%	20%	20%
	11日目以降	20%	70%	20%

(5) 人的被害

地震規模に応じた建物被害から、建物倒壊による死者数、要救助者数及び避難者数を算定した。避難者数の算定に用いた断水人口は、水の供給環境が復旧した後は、上記による避難者は堤内地の自宅に戻ると想定した。断水復旧率については、大都市圏の水道事業の事業継続計画¹¹⁾を踏まえ、災害発生5日目から28日目にかけて復旧率が0%から100%まで直線的に復旧すると設定した。

5. 地震による被害に対する復旧対応

(1) 道路啓開に要する日数

地震後の道路啓開に要する日数は、中部版くしの歯作戦¹²⁾において人命救助のための救援・救護ルートの確保に要する期間として目標設定されている3日と設定した。

(2) 堤防復旧に要する日数

堤防の復旧日数は、復旧工事に利用可能な重機数と復旧土砂量に依存すると設定した。復旧箇所の把握に必要な地震後の堤防点検の日数は、東日本大震災における実績等を踏まえ5日間と設定した。重機数は、当該モデル河川にて災害協定を締結している業者の重機数から表-4と設定した。なお、地震発生から道路啓開までは氾濫区域内の重機しか使用できないものとし、道路啓開後は氾濫区域を含む自治体の重機を使用可能とした。地震動毎の重機の稼働率は、東日本大震災の実績⁴⁾を参考に表-5と設定し、1日あたりの復旧土砂量を算定した。救助作業に重機が用いられることを考慮して堤防復旧に割り当て可能な重機を設定したが、救助作業が完了した段階でいずれの重機も100%の稼働率となるよう、救助活動の完了前後で変化させた。また、復旧用の土砂については現地または他エリアから供給可能であるとした。

6. 洪水による被害

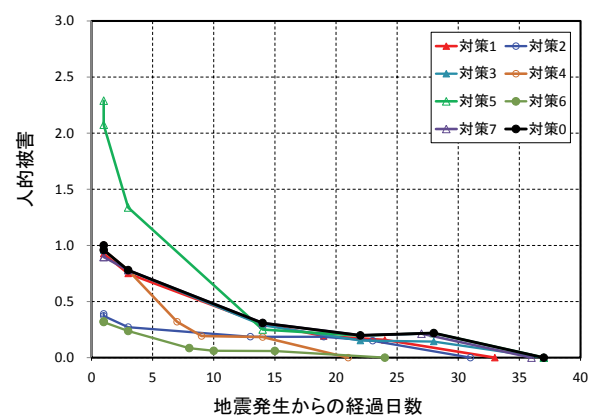
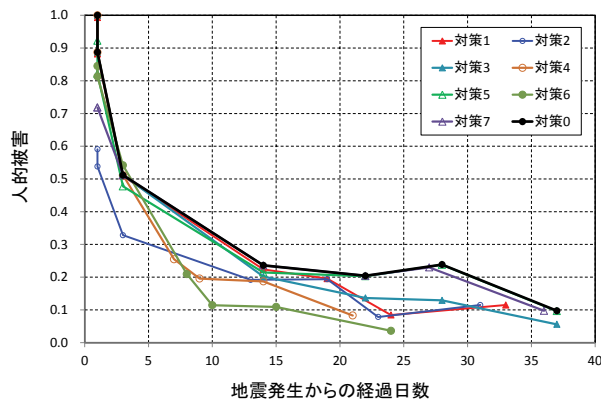


図-4 洪水発生時期と人的被害の経時変化

(左図：地震：L2規模，洪水：洪水規模2，右図：地震：L2規模，洪水：洪水規模1)

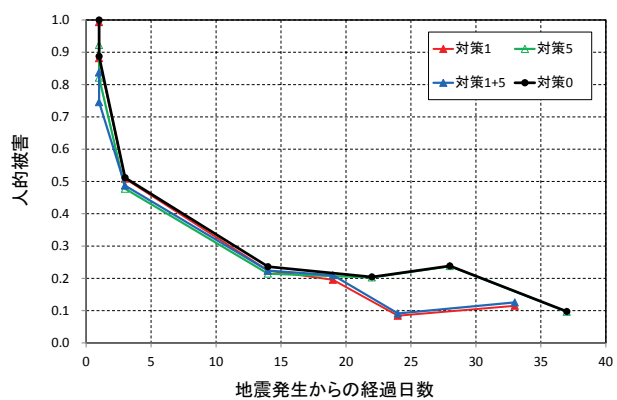
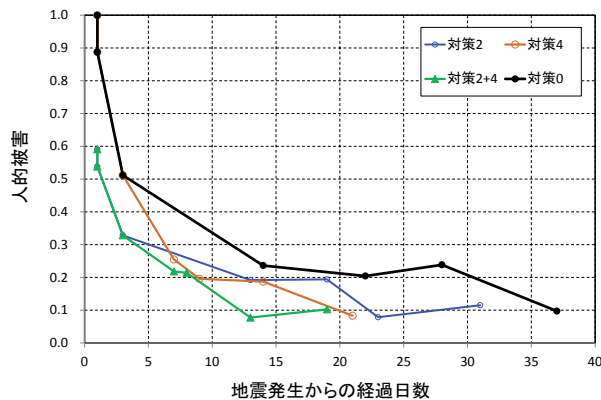


図-5 洪水発生時期と人的被害の経時変化（地震：L2規模，洪水：洪水規模2）

治水経済調査マニュアル¹³⁾及び水害の被害指標分析の手引（H25年度版）¹⁴⁾に基づき，地震の復旧途上における洪水時の被害を試算した。なお，洪水規模2における洪水単独時の被害は，対策1及び5条件下で低減するが，地震後に洪水が発生した場合と比して2オーダー程度小さい。従って，本稿では複合災害時の無対策条件下からの被害の低減について分析を行うこととした。地震後の洪水時の人的被害の試算にあたっては，4. (5) で算出した地震による死者数をメッシュ人口から減じた上で，人的被害を算出した。地震による要救助者については，地震から4日経過した段階で死亡するものとし，その間に洪水が生じたとしても地震が原因の死者とした。ただし，洪水が生じなければ救助されていたと想定される要救助者は洪水による死者とした。洪水に対する避難率は40%と設定したが，地震により避難所に避難した者は，洪水警報により全員避難し，洪水に対して安全であると仮定した。地震による半壊での危険水位帯については，年齢に関わらず自宅上階へ避難できないと設定し，1階床上から安全水位帯，準危険水位帯，危険水位帯を設定した。

7. 試算結果

(1) 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-4に示す。図-4の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-1で示した洪水発生タイミングを示している。

a) 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L2，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L1'，L1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っており，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。

b) 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場合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、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。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場合があることを認識しておく必要がある。

c) 各対策の組み合わせによる効果

図-5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。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、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。

8. 結論

- (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場合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。

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。

参考文献

- 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) 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, pp385-390, 2014.
- 5) 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）, 2013.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 消防庁：東日本大震災記録集, 2013.
- 10) 川上英二：震度, 被害率, 断水率の関係, 第53回土木学会年次学術講演会, 1998.
- 11) 名古屋市上下水道局：事業継続計画地震対策編, 2012.
- 12) 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（平成26年5月改訂版）（道路啓開オペレーション計画）, 2014.
- 13) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル（案）, 2005.
- 14) 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.

（2015. 4. 3受付）