

海岸堤防の粘り強さ向上による 減災効果の感度分析

渡辺 国広¹・姫野 一樹²・榊原 弘³・有村 盾一⁴・八木 裕子⁴
越智 達郎³・諏訪 義雄⁵

¹正会員 国土技術政策総合研究所 企画部企画課 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)
E-mail: watanabe-k92tc@nilim.go.jp

²非会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)
E-mail: himeno-k2mt@nilim.go.jp

³非会員 株式会社東京建設コンサルタント 環境防災部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

⁴正会員 株式会社東京建設コンサルタント 海岸・海洋部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

⁵正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

海岸堤防が津波越流に対して粘り強い構造となることが背後地における家屋被害軽減や避難時間確保に及ぼす影響について定量的に感度分析するために、43ケースの津波浸水シミュレーションを実施した。津波の規模と破堤遅延時間を変えて計算したところ、堤防の破堤が遅れることで津波浸水範囲の低減、背後地における津波到達の遅延が起こり、その効果は津波の規模が小さいほど顕著であることが確認された。また、堤防の破堤遅延時間が長くなると、内陸部における二線堤等による減災効果がより高くなることも確認された。堤防の残存率を変えた計算では、減災効果を得るにはある一定以上の残存率が必要であることを示唆する結果が得られた。これらの結果は、粘り強い構造の海岸堤防に関する技術開発の意義を示すものとなった。

Key Words : tsunami, simulation, coastal dike, sensitivity analysis, disaster risk

1. 背景と目的

東北地方太平洋沖地震津波（以下、今次津波）で多くの海岸保全施設が被災したことを受けて、「設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発を進め、整備していく」とする方針が中央防災会議等から示された。「粘り強い」とは、海岸保全施設が破壊・倒壊するまでの時間を少しでも長くする、あるいは、施設が全壊に至る可能性を少しでも減らすことである。これによって、避難に使える時間を確保する、第二波以降の被害を軽減する。迅速な復旧を可能とすることで二次災害のリスクや復旧費用を低減するなどの効果が期待される。

粘り強い海岸堤防の構造については、多くの研究者により検討が進められてきた。しかし、海岸堤防の建設費増に直結するため、現場に適用するにあたっては、背後地における減災対策との組み合わせを含めて費用対効果を考慮したうえで性能を決定することが求められる。そこで本研究では、海岸堤防が粘り強い構造となることが背後地における家屋被害軽減や避難時間確保に対して及

ぼす効果を津波浸水計算によって定量的に感度分析することを目的とした。

2. 方法

(1) 検討対象地と地形条件の設定

仙台湾南部海岸の名取川から阿武隈川までの範囲を対象とした。地形データは日本水路協会発行の海底地形デジタルデータ (M7000) 沿岸の海の基本図、東北地方整備局による河川縦横断データ、陸上は被災直後に国土地理院によって計測された結果をそれぞれ使用して構築されたものを用い、海岸堤防の高さは復旧後の高さとした。津波浸水計算の際には、海域、陸域ともに津波の断層モデルから算出される地盤変動量を考慮した。海岸堤防の破堤条件は次節のとおり海岸堤防の粘り強さに応じたものとした。背後地における減災対策との相乗効果についても確認するために、復興計画に示されている道路盛土等による二線堤等を考慮した地形での計算も6ケース実施した (表-1)。二線堤等は、嵩上げ後の閑上地区の地盤の高さをTP.+5m、貞山堀の土堤の高さをTP.+3.7m、

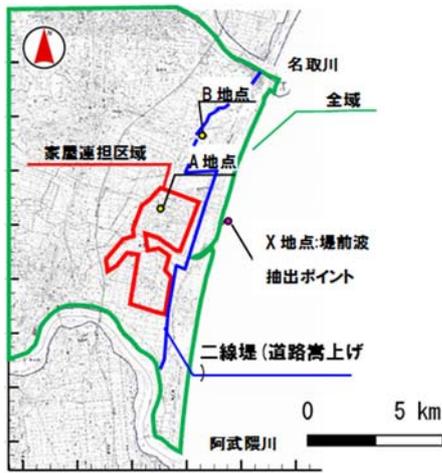


図-1 津波浸水計算の対象範囲と到達時間の計測地点

表-1 津波浸水計算のケース設定

X 地点における越流水深	破堤遅れ時間 (分)	残存率 (%)
2.0m	0, 1.5, 3, 4.5, 5, 7	96, 80, 50, 46, 40, 20, 11
4.0m	0, 1.5, 3, 4.5, 5, 7	80, 60, 40, 30, 24
6.9m	0, 1.5, 3, 4.5, 5, 7	60, 50, 48, 30, 24, 7, 4
6.9m + 二線堤有	0, 1.5, 3, 4.5, 5, 7	-

県道相野釜蒲崎線の高さをT.P.+5mとした。これらの設定は計算実施時点で得られた復興計画をもとにしており、不明点については周辺状況を考慮して設定しているため、必ずしも実際に進められているものとは一致しないことを留意されたい。地形データのメッシュサイズは1350m, 450m, 150m, 50m, 10mの5段階とし、陸上部分は10mメッシュとした。

(2) 計算モデルと計算条件

津波浸水シミュレーションの手法、計算条件は、津波浸水想定の手引きVer.2¹⁾に従って実施した。すなわち波源モデルの断層パラメータよりOkada (1985)の方法²⁾で計算される海底基盤の鉛直変位分布を津波の初期水位として海面に与え、外洋から沿岸への津波の伝播・到達は非線形長波理論を基礎方程式とする計算によって求めた。海岸堤防からの越流量は浸水想定区域図作成マニュアル³⁾に従い、本間の正面越流公式⁴⁾により完全越流の場合の式(1)と潜り越流の場合の式(2)により算定した。

$$Q = 0.35H_1\sqrt{2gH_1} \quad H_2 \leq \frac{2}{3}H_1 \quad (1)$$

$$Q = 0.91H_2\sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad H_2 > \frac{2}{3}H_1 \quad (2)$$

ここにQは単位幅あたりの越流量 (m²/s), H₁ (m), H₂ (m) はそれぞれ、堤防の天端高を基準とした場合の

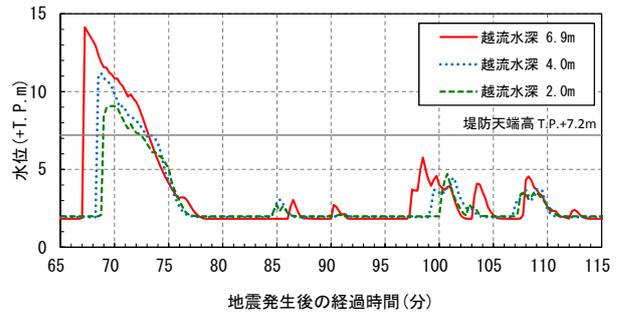


図-2 堤前(X地点)における津波水位の時系列変化 (海岸堤防の破堤なし)

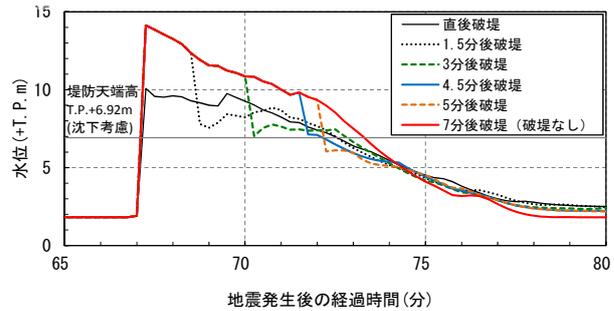


図-3 堤前(X地点)における津波水位の時系列変化 (越流水深6.9m)

堤防海側および堤防陸側における水位である。越流後の陸域における遡上計算は岩崎・真野⁵⁾の方法を用いた。潮位条件は阿武隈川河川整備基本方針に示されている朔望平均満潮位T.P.+0.76mとした。

(3) 計算ケース

海岸堤防を粘り強い構造としたことによる破堤の遅延効果を想定したケースとして津波が堤防を越流してから破堤するまでの時間 (以下、破堤遅延時間) を6通り設定した。越流時間が破堤遅延時間より短い場合は堤防の残存率は100%であるが、越流時間が破堤遅延時間を超えると残存率が0%となり、瞬時に破堤すると仮定した。

破堤確率が低減することを想定した設定としては、破堤遅延が無い条件で越流が発生した場合の堤防の残存率を5~7通り設定した。破堤箇所を決めるにあたっては、破堤が1メッシュ (10m) 毎に独立して起こると仮定し、Microsoft Excelの乱数発生関数を用いて各メッシュに0~1までの実数を与えた。この値を、海岸堤防の総延長に対する残存延長の割合が残存率と一致するようになるように設定した閾値と比較することで、その位置が破堤するか否かを判定した。

津波外力の大きさは堤防全面のX地点 (N 38° 7' 37.30", E 140° 56' 20.85", 図-1) における越流水深として定義し、東北地方太平洋沖地震津波の東北大モデルver.1.2⁶⁾を用いたときに得られる越流水深6.9m, その約6割, 3割の越流水深に相当する4.0m, 2.0mの3通りとなるように、断層モデルの地盤変異量を調整した (図-2)。

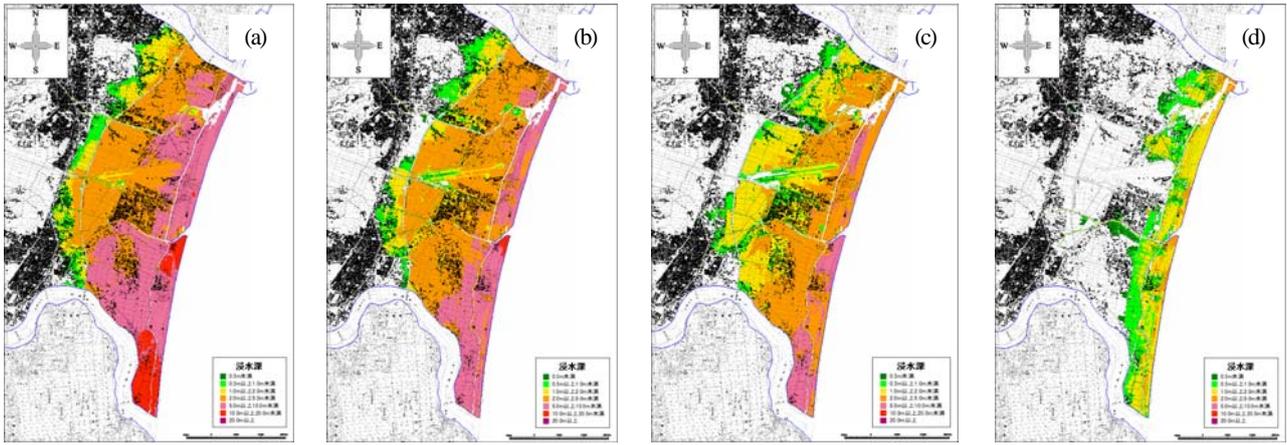


図-4 堤防の破堤遅延を考慮した計算による最大浸水深の分布 (a)越流水深6.9m 越流直後破堤, (b)越流水深6.9m 越流4.5分後破堤, (c)越流水深2.0m 越流直後破堤, (d)越流水深2.0m 越流4.5分後破堤

これらの組み合わせからなる計43ケースの津波浸水計算をおこなった (表-1) .

(4) 津波減災効果の評価

海岸堤防が粘り強い構造となることによる減災効果は、最大浸水深の分布、A地点 (N 38° 7' 54.57" , E 140° 54' 50.53" , B地点 (N 38° 9' 20.80" , E 140° 55' 54.71" , 図-1) における津波到達時間および津波水位の時系列変化によって評価した。なお、A地点は二線堤よりも陸側、B地点は二線堤よりも海側に位置する。

3. 結果

(1) 越流の継続時間と破堤の発生

堤防前面 (図-1中X地点) における水位の時系列変化 (図-2) によれば、越流水深6.9mとなる規模の津波の場合には地震発生から67.25分後には海岸堤防の前面に津波の第1波が到達して越流が発生した。堤防の残存率を固定して破堤遅延時間を変えたケースでは、越流時間が設定された海岸堤防の破堤遅延時間を超えると、堤防が破堤して津波のせきあげが解消されて堤防前面の水位が急減した。破堤遅延時間を7分としたケースでは津波の越流時間は最大で6.25分にとどまり、破堤遅延時間の設定を超えることがなかった。同様に越流水深4.0mとなる津波についても、破堤遅延時間が7分の場合には破堤が発生する前に越流が終了する結果となった。越流水深2.0mとなる規模の津波の場合には、越流時間は最大でも3.5分にとどまり、破堤遅延時間の設定が4.5分、5分、7分のケースではいずれも破堤しない結果となった。なお、堤防前面における地盤沈下量は越流水深6.9m, 4.0m, 2.0mでそれぞれ0.28m, 0.16m, 0.12mであった。

(2) 最大浸水深の平面分布

堤防の残存率を固定して破堤遅延時間を変化させた計算ケースでは、越流水深6.9mの場合の浸水範囲は、破堤が4.5分遅れた場合には直後破堤の場合に比べて、仙台東部道路より内陸の一部が浸水を免れる程度の違いであったが、浸水範囲内における最大浸水深はほとんどの箇所て低下した (図-4 (a), (b)) . これに対して越流水深2.0mの場合には、破堤が4.5分遅れることで浸水が海岸線から約500m内陸までの範囲に留まり、明瞭な違いが生じた (図-4 (c), (d)) .

家屋被害の指標として大部分の木造家屋が全壊する浸水深2m以上の面積に着目すると⁷⁾、どの規模の津波に対しても、破堤遅延時間が長くなるに従い、面積が減少する傾向が見られた (図-5) . 越流水深6.9mの規模の津波に対しては破堤が5分遅れた場合は3,727haとなり、越流直後に破堤する場合の4,503haと比べて面積が17.2%減少した。効果は津波の規模が小さいほど顕著であり、越流水深2.0mの場合には破堤が3分遅れるだけでも最大浸水深が2m以上となる面積が2,402haから1,278haへと46.8%減少した。

背後地の二線堤を考慮した計算では、越流水深6.9mの津波に対して破堤遅延が無い場合には、二線堤が加わることで低減される浸水範囲の面積は134haであった。こ

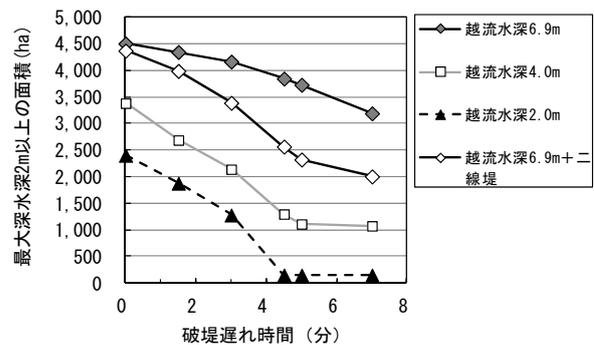


図-5 破堤遅れ時間と最大浸水深2m以上の面積の関係

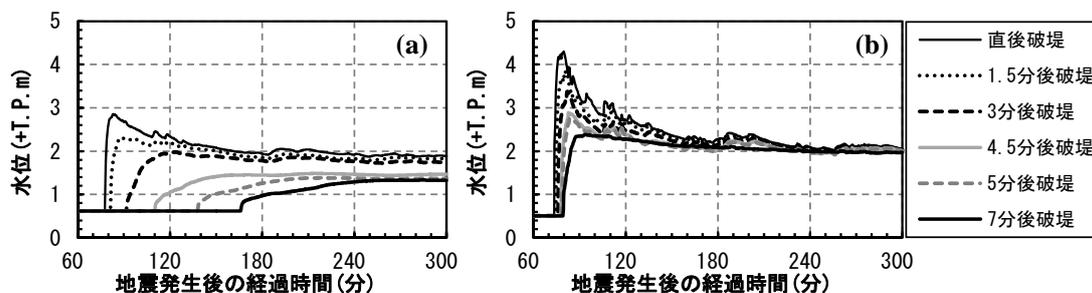


図-6 A地点における津波水位の時系列変化 (a)越流水深4.0m, (b)越流水深6.9m

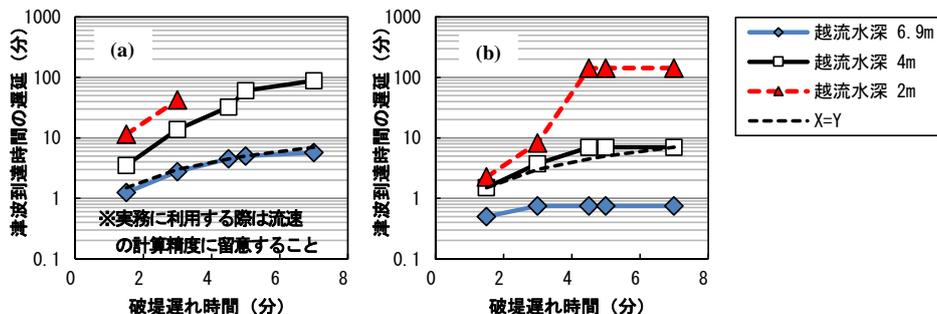


図-7 破堤遅れによる津波到達の遅延効果 (a)A地点, (b)B地点

れに対して破堤遅延が4.5分間の場合には、二線堤が加わることで浸水範囲の面積が1279ha減少した。

(3) 背後地における津波到達時間

破堤遅延時間についての感度分析では、海岸線から約2km内陸に位置するA地点(図-1)への越流水深4.0mの津波の到達時間は、破堤が4.5分遅れることで、破堤が遅延しない場合に比べて32.25分と大幅に遅れる結果となった。一方で、越流水深6.9mの津波については、破堤が4.5分遅れた場合の津波到達の遅延は4.5分に留まり、破堤遅延時間とほとんど変わらず、その他の遅延時間についても同様であった(図-6)。

また、海岸からの距離が同程度であるB地点(図-1)では、破堤の遅延による津波到達の遅延はA地点に比べて少なく、特に越流水深6.9mの津波に対しては破堤遅延時間が長くなっても津波到達時間はほとんど変わらない結果となった(図-7)。

二線堤の有無による違いに着目すると、越流水深6.9mの津波に対してA地点では直後破堤の場合には二線堤の存在によって遅延がさらに0.5分遅れるだけであった。これに対して破堤が4.5分遅延した場合には、二線堤があることでさらに3.75分、到達が遅延した(図-8)。またB地点については、二線堤の有無による到達時間の違いは見られなかったが、津波水位は二線堤が存在する場合の方が二線堤が無い場合と比べて高くなった(図-9)。

(4) 残存率の向上による津波浸水の変化

堤防の残存率を変化させた津波浸水計算では、得られた最大浸水深の分布に、破堤時間を考慮したものと傾向

に大きな違いは見られなかった。

残存率の増大に応じて浸水範囲の低減も大きくなる傾向が認められたものの、残存率と浸水面積は上に凸の関係となった(図-10)。例えば堤防の残存率が0%から7%に上昇した場合、最大浸水深が2m以上となる面積は4,503haから4,487haへと16ha(0.36%)減少するだけであったのに対して、残存率が50%から60%に増加した場合には、浸水面積は4,222haから4,115haへと107ha(2.5%)も低減した。すなわち、堤防の残存率が低い場合には多少の残存率の増加では浸水面積は低減しないが、残存率がある程度高い場合には残存率の増加による浸水範囲の低減効果が明確になるという傾向にあった。

4. 考察

(1) 破堤遅延による浸水面積の低減効果

計算をおこなった全ての規模の津波について、越流開始から破堤までの時間が長くなるほど浸水面積が低減する傾向は共通していたが、低減効果は津波の規模が小さいほど顕著であった(図-5)。小規模な津波ほど発生確率が高いことを考えれば、海岸堤防を粘り強い構造とすることの費用対効果は、最大クラスの津波(L2津波)だけでなく、様々な規模の津波を想定した評価も重要であると考えられた。ただし本研究の結果は、越流水深4.0m, 2.0mの規模の津波については波源モデルの設定が簡便なものであるので、津波の規模が小さくなれば継続時間も小さくなる(図-2)。実際には規模が小さくても継続時間が長い場合もあることにも考慮せねばならない。

(2) 二線堤等による減災効果の向上

海岸堤防の破堤遅延が無い場合には二線堤が加わっても越流水深が6.9mの津波による浸水面積はほとんど変わらないが、破堤遅延がある場合には二線堤が加わることで浸水面積が大きく低減する結果となった(図-5)。

二線堤よりも海側に位置するB地点では、二線堤が存在したほうが津波水位が高かったことを考慮すれば(図-9)、海岸堤防と二線堤の間に越流水が留まることで、本間の公式によって算定される海岸堤防からの越流量が抑制された結果と考えられた。

この結果は、海岸堤防を粘り強い構造とすることで、背後地に構築される二線堤がより効果を発揮しやすくなることを示すものである。二線堤によって堤防背後に一時的に貯留される水はウォータークッションとして、海岸堤防の破壊の主要因である裏法尻における洗掘の低減に寄与し、より堤防が壊れにくくなることも期待される。

(3) 津波到達遅延効果

越流水深4.0mの規模の津波に対しては、破堤が4.5分遅れるだけでもA地点への津波到達は30分以上遅れる結果となった(図-6)。この時間は避難の可能性を高めるうえでは十分な効果である。地震発生から津波到達までの時間が短い、南海トラフ巨大地震の浸水想定地域においては人的被害の低減に大きく寄与するものと考えられる。また、さらに破堤が30秒遅れて5分の遅延となった場合には、到達時間は60.5分まで増加した(図-6)。このように破堤時間の遅延に対して津波到達時間の遅延は指数

関数的に増加することから、技術開発によって海岸堤防の粘り強さを向上させることは大きな減災効果を生む可能性があることが示された。

(4) 地点による津波到達遅延効果の違い

海岸堤防の破堤遅延が背後地における津波到達に与える影響は、海岸からの距離が同程度であるにもかかわらず、B地点では小さかった(図-7)。津波水位の時系列変化によれば、破堤が4.5分遅延した場合のB地点における水位は、津波到達後にTP.+3~4mまで急上昇して停滞したあと、地震発生から75分後周辺で再び急激に上昇した。この結果は、浸水経路が2通り存在したことを示唆する。

A地点はの北の名取川と南の阿武隈川のほぼ中間地点にあるのに対してB地点は名取川に近い。そのため、1回目の水位上昇は名取川を遡上した津波が河川堤防を越えてきたものであり、海岸堤防を越流してきた津波は2回目の水位上昇が相当するものと考えられた。このことは、B地点における2回目の水位上昇は直後破堤の場合の水位上昇から約4.5分遅れており、A地点における遅延効果と同等であったことから支持される。

この結果は、海岸堤防を粘り強くすることの効果は地点によって大きく異なる場合もあり、代表点で得られた結果を地域全体について適用するべきではないことを意味する。効果を評価する場合には必ず津波浸水計算を実施して、津波の遡上経路や時系列の水位変化なども確認せねばならない。

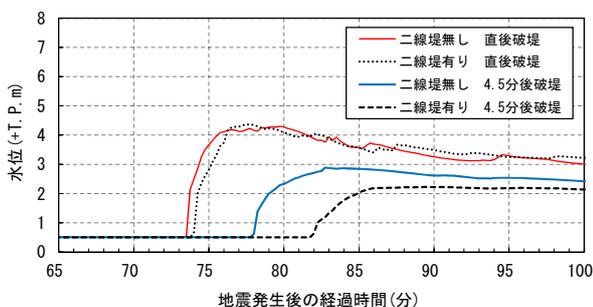


図-8 二線堤の有無による津波水位の時系列変化の違い (A地点: 越流水深 6.9m)

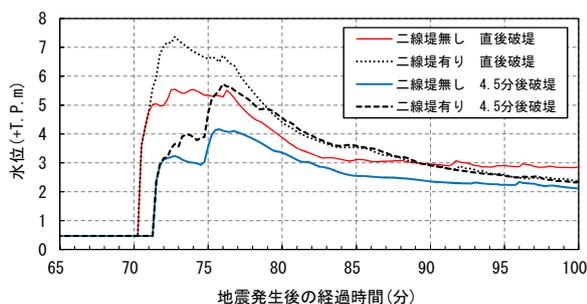


図-9 二線堤の有無による津波水位の時系列変化の違い (B地点: 越流水深 6.9m)

(5) 堤防の残存率を想定した効果の評価

堤防の残存率が低い時には残存率が多少増加しても減災効果は大きく変わらなかった(図-10)。残存する箇所が10mごとにランダムに決まる場合には、ある箇所が残存したとしても近隣からの浸水があるため、背後への浸水にはあまり影響がないためと考えられる。この結果は、堤防の粘り強さを向上させる場合には、想定する外力に対して一定以上の残存率を確保することが重要であることを示唆する。例えば越流水深4.0mの規模の津波に

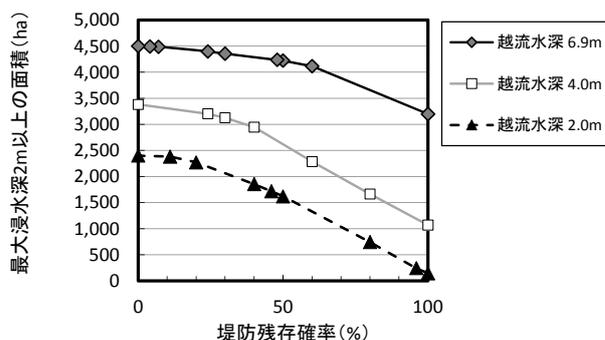


図-10 堤防残存率と浸水面積の関係

対しては約30%以上の残存率が求められるので、これを開発目標として設定することも考えられる。

(6) 実務への適用にあたっての留意点

海岸堤防を粘り強い構造とする工夫についてはいくつか提案されているものの³⁾、それによる破堤の遅延や破堤確率の低減などの効果を定量的に示すことができる段階にまではない。また、背後地における津波到達時間は越流水の流速に大きく依存するが、本研究で用いた津波浸水計算手法は浸水範囲については精度が高いが、水深方向に等流速を仮定しているために、流速の精度については保証されていない⁴⁾。

今回の検討では海岸堤防の粘り強さは全て同じとして単純化した。実際には海岸堤防を全て同じ構造に設計したとしても、その地点の地盤や施工時の条件によって品質にばらつきが生じることが予想される。仮に計算手法が高度化され、流速の計算精度が高くなった場合にもこうした不確定要素は残ることから、粘り強い構造としたことによる効果を過信したまじづくりとならないように留意せねばならない。

5. まとめ

本研究では、海岸堤防を粘り強い構造とした場合の効果について津波浸水計算をおこない、以下の結果を得た。

- ・堤防の破堤が遅れることで津波浸水範囲の低減と背後地における津波到達の遅延効果が得られ、その効果は津波の規模が小さい時ほど顕著である。
- ・堤防の破堤遅延時間が長くなると、内陸部における二線堤等による減災効果がより高くなる。
- ・堤防の残存率を高めることで減災効果を得るには、津

波の規模に応じたある一定以上まで残存率を高めることが必要である。

これらの結果は、海岸堤防を粘り強くすることが背後地の減災に寄与することをはじめて具体的に示したものであり、粘り強い構造の海岸堤防に関する技術開発の意義を示すものでもある。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室, 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室: 津波浸水想定の設定の手引き Ver.2.00 (オンライン), http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/sai-gai/tsunami/shinsui_settei.pdf, 2012. 参照 2015-5-9.
- 2) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.75, pp.1135-1154, 1985.
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課水防企画室, 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター水害研究室: 浸水想定区域図作成マニュアル (改訂版) (オンライン), <http://www.mlit.go.jp/river/bousai/main/saigai/tisiki/sy-ozaiti/pdf/01.pdf>, 2014, 参照 2015-5-9.
- 4) 本間 仁: 低溢流堰堤の流量係数 (第二編), 土木学会誌, 第26巻, 第9号, pp.849-862, 1940.
- 5) 岩崎敏夫, 真野明: オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第26回海岸工学講演会講演集, pp.70-74, 1979.
- 6) 今村文彦, 越村俊一, 馬淵幸雄, 大家隆行, 岡田清宏: 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル (version1.2) (オンライン), http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/drcr_ver1.2.pdf, 2012. 参照 2015-5-9.
- 7) 首藤伸夫: 津波強度と被害, 東北大学津波工学研究報告, 第9号, pp.101-136, 1992.

(2015.3.18 受付)

SENSITIVITY ANALYSIS FOR EVALUATING THE DISASTER RISK REDUCTION ACHIEVED BY ENHANCING PERSISTENCE OF COASTAL DIKES AGAINST TSUNAMIS

Kunihiro WATANABE, Kazuki HIMENO, Junich ARIMURA, Hiroko YAGI, Tatsuro OCHI and Yosio SUWA

The effectiveness of coastal dikes was quantitatively assessed by simulating 43 cases of tsunami inundations. The duration of a tsunami overflow that a coastal dike can withstand was assumed to be the persistence of the dike against a tsunami. Three types of tsunami height, six levels of dike endurance, and 5 to 7 types of dike collapse probabilities were selected as parameters for investigating the sensitivity of the dike endurance to risk reduction. The area of inundation and the available evacuation time were selected as the indexes representing the expected reduction in risk; these parameters were compared between cases. The results showed a clear relationship between the persistence levels of a dike and the degrees of risk reduction. The effect of enhancing the persistence of a dike to reduce damage is high when the height of a tsunami is low. The road and the bank also exhibit a synergistic disaster reduction effect when they are constructed landward as secondary dike-like structures. These results are the first quantitative evidence supporting the necessity of reinforcing coastal constructed in the Tohoku district.