津波に対する盛土の 多重防御の事例と効果の検証

嶋川 純平1·常田 賢一1

1大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻(〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1)

2011年東北地方太平洋沖地震では、巨大な津波により甚大な被害を受けたが、南海トラフ巨 大地震が危惧されている関西圏では、津波災害への対策が喫緊の課題となっている.上記の震 災後、巨大津波に対する多重防御の概念が提起されたが、未だ十分な検討がなされていないの が実情である.本稿では、盛土の耐津波性および多重防御の有効性の検証を目的に、道路盛土 および鉄道盛土による多重防御が示唆された岩手県大槌町浪板地区を対象とした盛土被災調査 および津波シミュレーションを実施した.その結果、特に、道路盛土は10m以上の津波越流を 受けながらも舗装が残存し致命的な被害には至らなかったこと、両盛土の多重防御により、最 大3m程度浸水深が低減したこと等、盛土多重防御による津波減勢効果が明らかとなった.

キーワード 津波,盛土,耐侵食性,多重防御

1. はじめに

2011年3月11日14時46分,東北地方太平洋沖地震が発生し,東北地方の沿岸部に津波高20mを超える巨大な津 波が来襲した.この津波によって,防潮堤や防波堤をは じめとする津波防潮構造物は破壊され,背後の市街地に 甚大な被害が及んだ.

同震災を受けて、中央防災会議では、今後起こりうる 想定外の巨大津波対策として、津波対策構造物を複数設 けて津波を減勢させる"多重防御"の概念が提示された. 例えば、仙台東部道路は、海岸から3-4km程度内陸側に 位置しており、海岸の防潮堤に対する2線堤として、津 波の浸水を抑制したとされる.しかしながら、多重防御 による事例や知見は数少なく、多重防御の具体化が必要 である.

著者らは、上記の仙台東部道路以外の特筆すべき事例 として、岩手県上閉伊郡大槌町浪板地区(図-1参照)に着 目した.同地区は、海岸から100mおよび300mの内陸側 に、道路盛土および鉄道盛土がそれぞれ位置しており、 今次津波において相当規模の津波が盛土を越流したが致 命的な被害に至らずに残存し、多重防御として津波減勢 に寄与したことが示唆される貴重な事例である.

そこで、本研究では、盛土による多重防御の有効性を 検証することを目的に、盛土の耐津波性能および盛土の 津波減勢効果を検証した.具体的には、前者については 浪板地区の各盛土が受けた津波の諸元と盛土の被害状況 を整理することで検討した.後者については、津波シミ ュレーションを用い、2つの盛土による津波減勢効果お よびその向上策についても検討した. 関西圏では、近い将来、南海トラフ巨大地震の発生が 危惧されているが、東北地方太平洋沖地震と比較して、 震源が近い同地震では、より強い地震動の作用とより巨 大な津波がより早く来襲するため、近畿圏ではより甚大 な被害が予想される.そのため、東北地方太平洋沖地震 を教訓とするとともに、両地震の違いを考慮した地震、 津波の対策が緊要である.本研究による盛土の耐津波性 および多重防御への活用に関する知見は、今後の津波対 策において非常に有益である.

2. 浪板地区の概要

本文の検証対象地である岩手県上閉伊郡大槌町浪板地 区の位置を図-1に,拡大衛星写真を図-2に示す. 浪板地 区はリアス式海岸であり,津波高が増幅されやすい湾に



図-1 浪板地区の位置

なっている.また,内陸側は山地に繋がり急勾配となっ ており,津波到達距離は最大でも800m程度(解析結果に よる)である.南北方向の標高は,浪板川付近を最低部 として,南北方向に徐々に標高が高くなる谷底低平地の 地形である. 浪板地区には,海岸に沿って高さ4m程度 の防潮堤,海岸から内陸側100m程度に国道45号の道路 盛土,さらに200m内陸側にJR山田線の鉄道盛土がある.

これらの防潮堤,盛土は、今次津波による越流を受けながらも致命的な被害に至らず,概ね残存している. ここで,道路盛土,鉄道盛土はいずれも盛土高が6m程 度であるが,浪板地区は内陸ほど標高が高いため,最 低部の天端の標高は,道路盛土で9m程度,鉄道盛土で 17m程度である.また,各盛土の渡河部は,いずれも橋 梁構造であり,道路橋では側道橋が流出し,鉄道橋は 流出したが,押し波は盛土の越流,橋梁の開口部から の浸水により,盛土背後に到達するとともに,引き波 は盛土の越流,開口部からの流出が想定される.

3. 盛土の耐津波性能に関する検討

本章では、盛土被災状況と盛土が受けた津波諸元の 推定結果とを整理することで、盛土の耐津波性能を検 討した.津波諸元の推定に際しては、地元住民に対す るヒアリングおよび津波シミュレーション結果に基づ くが、後者については、4章にて詳述する.一方、盛土 被災状況の整理については、津波直後の盛土被災写真 および盛土被災の現地調査に基づいている.

(1) 浪板地区における津波諸元の推定

シミュレーションによって得られた津波越流深およ び津波流速の経時変化を図-3に示す.なお、同図は、浪 板川付近の道路盛土における結果である.

同図より, 浪板川付近の道路盛土における津波越流 深は最大10mに達している.ここで, 津波の第1波にお いて流速が"-(陸方向)"から"+(海方向)"に変わっ ていることから, 津波の第1波は, 押し波に加えて, 引 き波も道路盛土を越流していることが分かる. 紙面の 都合上割愛しているが, 鉄道盛土における越流深は2.2m 程度であり, 道路盛土と同様に, 第1波の押し波と引き 波の両方が越流している結果となった.また, ヒアリ ング結果でも引き波が両盛土を越流していたことが明 らかとなっており, 解析結果は実現象と一致している. 当地区で最大である津波の第1波(押し波と引き波)が盛 土を越流した時間は図-3より, 道路盛土で11.8分間と算 出されている.これは, 押し波による越流時間と, 引 き波による越流時間を足し合わせている.同様に, 鉄 道盛土の越流時間は3.1分間と算出された.

これに対して、鷲見による津波痕跡高⁰および地元住 民に対するヒアリングから、道路盛土での越流深は 10~11m,鉄道盛土では2~3mと推察するとともに,越流時間は,道路盛土で15分程度,鉄道盛土で10分程度と予測しており²,シミュレーション結果は,越流時間を過小に算出しているが,越流深については実現象とほぼ整合している.



図-2 浪板地区の航空写真







写真-1 道路盛土の被災写真(2011年3月撮影)



写真-2 鉄道盛土の被災写真(2011年3月撮影)

(2) 浪板地区の盛土の被災状況

道路盛土の被災状況を写真-1(三陸国道事務所による) に,鉄道盛土の被災状況を写真-2(野崎氏および台野氏 による)に示す.写真-1は,浪板川の橋梁の右岸橋台か ら釜石市方面(南側)の道路盛土の被災状況である.同写 真より,手前の橋台背面の道路盛土で,引き波による侵 食が顕著に見られる.これは,橋梁位置が最も標高が低 く,津波流が集中し易いこと,盛土と橋台との構造の不 連続による侵食の増進に起因するとともに,引き波が押 し波よりも流速が大きいことによると推察している.こ こで,注目すべき点は,舗装は剥離しているが,路盤・ 路床は残留し,決壊には至っていないことである.これ は,同写真の奥側の盛土の一般部では,さらに顕著であ り,車道の舗装が残留している.

盛土天端の舗装などの補強による津波侵食の拡大抑制 は、仙台平野の井土浦地先の越流深4m程度の河川堤防³ および津波越流の再現実験⁴でも指摘済みであるが、当 該地区は10mを超える越流深に対する耐津波性の実証例 として、意義が大きい.

写真-2は浪板海岸駅より釜石市側を望んだ鉄道盛土の 被害状況である.同盛土は震災以降,復旧されず,震災 当時の状態であったため,2014年6月に鉄道盛土の侵食 状況および盛土の材料特性の計測を実施した².その結 果,侵食深は右岸橋台から10m以内では,橋梁に近いほ ど大きく最大2.7mであり,橋台から10m~80m離れた範囲 でも0.6~0.8m程度の侵食が確認された.橋梁付近につい ては,道路盛土よりも被害は侵食量は少ないが,橋梁に 近いほど侵食が顕著であること,引き波による侵食が顕 著であることは類似である.一方で,橋梁から離れた箇 所については,鉄道盛土の方がより侵食されている.こ れは,鉄道盛土の天端は,流出しやすいバラストによる 補強のみで侵食され易いこと,盛土の締固め度が77%と 低い値であることに起因すると推察している.

(3) 浪板地区の盛土の耐津波性能

上述した盛土の被害状況と盛土に作用した津波諸元の 推定についてまとめる. 道路盛土には,越流深10m,(痕 跡高からは10~11m)の津波の第1波が12~15分程度(解析で は11.5分程度)押し波・引き波として作用したが,道路盛 土は天端高を概ね保持し,比較的侵食しやすい箇所でも 決壊には至らなかった.従って,条件にもよるが,道路 盛土のように十分に締固められた盛土でアスファルト舗 装により天端補強することで,10mを超える津波越流に 対しても耐えうる性能を有することが示唆された.

一方,鉄道盛土は,越流深2m(痕跡高からは2~3m)の津 波を7~10分程度(解析では3分程度)受けた.そのため、山 側にある鉄道盛土は道路盛土に比べて津波の影響は小さ かったが,橋梁から離れると一様に60~80cm程度の天端 侵食があった.これは天端がバラスト構造であること, 締固め度が比較的低いことに起因する.しかしながら, 鉄道盛土においても、破堤することは無く、相応の形状 が保持されており、津波に対する耐侵食性を有すること が示唆された.

4. 多重防御による津波減勢効果の検討

(1) 解析条件

本研究では、非線形長波理論式に基づいたシミュレーションモデルを用いて解析を実施⁵した.解析における詳細な条件を表-1に示す.ここで、波源モデルは、藤井・佐竹ver.4.6モデルを用いるが、当該海岸における実測値と適合するように地殻変動量を調整した.調整においては、相田による幾何学平均Kおよび幾何標準偏差k⁶を指標として用いた.

本解析は盛土による津波減勢効果の検証が主たる目的 であり、実地形を正確に再現することが重要である.そ こで、解析対象地の浪板地区付近では、比較的細かい 10mメッシュで計算したが、盛土の天端高についてはよ り正確に再現するため、盛土に沿うメッシュの境界には、 天端高と同等の格子境界壁を設置している.なお、本解 析では侵食による盛土形状の変化を考慮できないが、今 次津波における天端の侵食は軽微であったことから、結 果に大きな差異はないと判断した.

解析に用いた地形データは、岩手県提供のデータを用いたが、盛土の天端高は、鉄道盛土についてはJR東日本

表-1 解析条件

基礎方程式と解法	非線形長波方程式(Leap-Frog差分法)	
越流境界	本間公式による越流計算	
計算格子間隔	1350m、450m、150m、50m、10m	
計算時間間隔	0.1s	
地盤変位量	Okada(1992)の手法より算出	
陸上遡上計算に	10 ⁵ (水域側水位と陸域側地盤高の差が	
おける波先端条件	条件を超える場合に適用)	
1350m~50mは中央防災会議公開データ、		
粗度係数	10m格子は岩手県より提供されたデータを	
	使用	
波源モデル	東京大学 藤井・佐竹モデル(ver.4.6) [※]	
潮位	津波来襲時の潮位:T.P0.42m	

表-2 解析ケース

		<u></u>
	道路盛土	鉄道盛土
Case1	現状	現状
Case2	現状	なし
Case3	なし	現状
Case4	なし	なし
Case5	+2m	現状
Case6	現状	+2m
Case7	渡河部遮蔽	現状
Case8	現状	渡河部遮蔽
Case9	現状	渡河部25%遮蔽
Case10	現状	渡河部50%遮蔽
Case11	現状	渡河部75%遮蔽

より提供いただいた盛土標高データ,道路盛土について は国土交通省東北地方整備局三陸国道事務所より提供い ただいた緊急調査報告書を参照して決定した.

解析ケースを表-2に示す.ここで、Casel~Case4については、現況の各盛土の減勢効果を個別に検討することを、 Case5~Case11までは、盛土の減勢効果の向上策を検討することを目的にそれぞれ実施した.

本稿では、津波減勢効果として、浸水面積の低減効果 および津波到達時間の遅延効果(以下、津波遅延効果と 呼ぶ)に着目している.また、津波到達時間は、地震発 生から浸水深が20cmに達するまでの時間と定義した.

(2)鉄道盛土および道路盛土による津波減勢効果

1)浸水面積

Case1~Case4における浸水面積を図-4に示す. 同図よ り,道路盛土による浸水面積の低減効果(Case4-Case2)は, 5,600m²,鉄道盛土による効果(Case4-Case3)は,16,900m²で ある.したがって,鉄道盛土によって低減する浸水面積 は,道路盛土によって低減する浸水面積の3.0倍程度で ある.これは,盛土高と盛土に作用する津波高に起因す る.つまり,道路盛土と鉄道盛土はほぼ同程度の盛土高 であるが,道路盛土は海岸に近いため,越流した津波高 が鉄道盛土より大きく,浸水面積の低減効果は小さかっ たと考えられる.また,Case1の浸水面積はCase2,Case3 のそれよりも小さいことから,盛土を多重に設置するこ とで,浸水面積がより小さくなることが示された.

2) 津波到達時間

盛土による津波遅延効果の分布を図-5に示す.たとえ ば、同図(a)はCase4とCase2の津波到達時間の差で、正の 数値が大きいほど道路盛土による津波遅延効果が大きい ことを示す.また、600sec以上に分類される領域は、盛 土が無い場合(Case4)は浸水していたが、盛土の効果によ って浸水が免れた領域であり、-600sec以下の領域は、盛 土がない場合には浸水していなかったが、盛土があるこ とで浸水してしまう領域を示している.Case4同図(a)よ り、道路盛土によって、道路盛土背後の広い領域で10秒 以上、部分的には60秒以上、津波の到達が遅い.また、 同図(b)より、鉄道盛土も同様に、鉄道盛土背後におけ る津波の到達は10秒以上遅い.しかしながら,いずれの 場合も渡河部付近,つまり開口部付近では盛土による津 波遅延効果が見られない.同図(c)より,道路盛土および 鉄道盛土の両方を設置することで,2つの盛土の遅延効 果を足し合わせた傾向を示している.具体的には,一部 を除くほとんどの領域で津波の到達を10秒以上遅延して いる.

以上より,盛土による津波減勢効果は示され,また盛 土を多重に設置することで,その効果がより大きくなる ことが明らかとなった.





図-5 盛土による津波遅延効果の分布

(3) 盛土の嵩上げおよび渡河部遮蔽による津波減勢効果

本節では、浪板地区の道路盛土および鉄道盛土を基礎 データとして、今後の津波対策に有効な構造を検討する ことを目的とし、盛土の2m嵩上げおよび渡河部遮蔽に よる津波減勢効果の検討を試行した.構造条件は表-2に 示すCase5~Case11であり、嵩上げは道路盛土(Case5)およ び鉄道盛土(Case6)とした.また、遮蔽する渡河部は、鉄 道盛土が幅40m、道路盛土が幅30mであり、道路盛土で は完全遮蔽(Case7)とし、鉄道盛土は遮蔽率を25%(Case9)、 50%(Case10)、75%(Case11)および100%(Case8)を想定した. 1)浸水面積

Case1, Case5~Case8における浸水面積を図-6に示す. まず,盛土を嵩上げしたケースの浸水面積の低減効果は 現状(Case1)と比べて道路盛土のみ嵩上げ(Case5)で3,800m², 鉄道盛土のみ嵩上げ(Case6)で6,400m²,であった.次に, 渡河部を遮蔽したケースの浸水面積の低減効果は,現状 (Case1)と比べて,道路盛土のみの遮蔽(Case7)で2,100m², 鉄道盛土のみの遮蔽(Case8)で24,900m²であった.

したがって,道路盛土を2m嵩上げするより鉄道盛土 を2m嵩上げする方が1.7倍程度,また,道路盛土を遮蔽 するより鉄道盛土を遮蔽する方が12倍程度,浸水面積の 低減には有効である.一方,2mの嵩上げと渡河部遮蔽 の効果について比較すると,道路盛土は,渡河部を遮蔽 するよりも2m嵩上げする方が1.8倍程度,浸水面積の低 減には有効であるが,鉄道盛土はこれと異なり,2m嵩 上げするよりも,渡河部を遮蔽する方が3.9倍程度有効 である.

2) 津波到達時間

盛土の嵩上げおよび渡河部の遮蔽による津波遅延効果 の分布を図-7に示す.まず,盛土を嵩上げしたケースの 現状ケースに対する津波遅延効果に着目する.道路盛土 の嵩上げ(図(a))によって,鉄道盛土背後において津波到 達が10~30秒程度遅延している.一方,鉄道盛土の嵩上 げ(図(b))による遅延効果は,ごく僅かであった.

次に、盛土渡河部の遮蔽による津波遅延効果に着目す

ると、全体的に、盛土渡河部を遮蔽することで現状より 津波の到達を大きく遅延している.ここで、道路盛土に よる遅延効果(図(c))は、道路盛土から鉄道盛土間で概ね 1分以上、鉄道盛土背後でも広い領域に渡って 10~30 秒 程度の遅延効果がある.一方、鉄道盛土による遅延効果 (図(d))は、鉄道盛土背後のみで概ね 30 秒以上であった.

(4)開口部の遮蔽割合

上記では、鉄道盛土の渡河部を完全に遮蔽することで 浸水面積や津波到達時間が抑制されることが示された. しかしながら、治水の観点から、渡河部を完全に遮蔽す ることは困難であり、現実的には渡河部を縮小する対策 が想定される.そこで、本節では、渡河部の遮蔽率と浸 水面積の関係について検討する.

各遮蔽率における浸水面積を図-8に示す.同図より, 遮蔽率が大きくなるのに伴って,浸水面積は指数的に小 さくなる.具体的には,Case9の浸水面積はCase1のそれ より僅かに減少する程度であり,25%の遮蔽ではほとん ど浸水面積の低減効果はないことがわかる.一方,75% 遮蔽することで低減する浸水面積(Case1-Case11)は, 100%遮蔽することで低減する浸水面積(Case1-Case8)の





図-7 嵩上げ・渡河部の遮蔽による津波遅延効果の分布

60%程度に相当する.ここで, Casel1の浸水面積は, 盛 土の2m嵩上げしたCase5, Case6の浸水面積より小さい.

5. まとめ

本研究では、浪板地区の鉄道盛土の津波被害に関する 現地調査および津波シミュレーションにより、道路盛土 と鉄道盛土の耐津波性および多重防御としての津波減勢 効果、さらに盛土の構造条件の変更による津波減勢効果 の変化について検討した.

本研究により得られた知見を以下に示す.

- 1) 道路盛土は、津波の第1波(押し波と引き波)により浸水 深10m程度の津波に最大12~15分程度(解析では11.8分程 度)の越流を受けたが、決壊せずに残存し、天端高も 概ね維持している.従って、適正に締固め管理され、 アスファルト舗装で天端補強された状態の道路盛土は、 少なくとも越流深10m程度の越流に対して粘り強く、 破堤することは無い耐津波性を有することが示唆され る.
- 2)鉄道盛土は、締固め度が80%程度で比較的緩い状態にあり、津波の第1波(押し波と引き波)により浸水深2m程度の津波に7~10分(解析では3.1分程度)の越流を受けたが、天端では60~70cm程度の侵食被害に留まる.従って、比較的締固め度が低く、バラストだけの盛土でも、少なくとも越流深2~3m程度の津波に対して、破堤することは無く、相応の粘り強さを保持することが示唆される.
- 3) 道路盛土と鉄道盛土によって浸水面積が低減しているが、 浪板地区においては、道路盛土より鉄道盛土の方が、 浸水面積の低減効果は3倍程度大きい。
- 4) 盛土により背後への津波の到達を10秒程度,部分的に 60秒以上遅延できるが,開口部がある場合,開口部の 付近では,遅延効果は見られない.
- 5) 盛土を多重に設置した場合,盛土1つの場合より減勢 効果は大きくなり,特に,多重に盛土がある場合の津 波遅延効果は,概ね各盛土のそれを足し合わせた効果 の発現を示す.
- 6) 浪板地区において、今後、津波対策を講じる場合、浸水面積の低減には、道路盛土は渡河部の遮蔽よりも2 m嵩上げが、鉄道盛土は2m嵩上げより渡河部の遮蔽が

有効である.また,津波の到達時間の遅延には,盛土の嵩上げより,渡河部の遮蔽が有効である.

7)鉄道盛土の渡河部40mの25%遮蔽による浸水面積の低 減は僅かであるが、75%程度の遮蔽であっても100%遮 蔽の60%程度の低減効果があり、これは盛土を嵩上げ するよりも有効である.

以上, 浪板地区の道路盛土と鉄道盛土による多重防御 の事例解析により, 有益な知見が得られたが, 当該地区 の谷底低地部は奥行きが700m程度と狭く, 津波高が大 規模であるために, 盛土の多重防御効果も比較的小さか った. 奥行きのある地形あるいは津波高によって, 盛土 あるいは多重防御の効果はより期待できると思われる.

最後に,盛土は既存の防潮堤と比較しても多様な機能 ^かがあるので,今後,南海トラフ巨大地震に対する津波 多重防御策の一つとして,盛土の活用が望まれる.

謝辞: 浪板地区交流センター館長の野崎勝憲氏および同 地区代表台野宏氏には、ヒアリングおよび被災写真の提 供の協力を頂いた.また、東北地方整備局三陸国道事務 所および東日本旅客鉄道(株)には、それぞれ、被災写真、 道路構造諸元データの提供および現地立会い、鉄道盛土 の構造データの提供を頂いた.関係各位に感謝申し上げ る.

参考文献

1) 鷲見哲也: http://www.daido-it.ac.jp/~t-sumi/lab/index.htm.

- 2)常田賢一・嶋川純平・植田裕也・小林拓也・大塚隆人・永井 浩泰:道路盛土と鉄道盛土の耐津波性および津波多重防御 の検討, Kansai Geo-Symposium2014, pp.101-106, 2014.
- 3) 常田賢一・谷本隆介:2011 年東北地方太平洋沖地震の現地調 査による防潮堤などの津波被害特性,土木学会論文集 B2(海 岸工学), Vol.68, No.2, pp.1406-pp.1410, 2012.
- 常田賢一・竜田尚希・鈴木啓祐・谷本隆介:津波防潮堤の評価および防潮盛土の耐侵食性の確保・向上,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, P0012, L_1016-L_1020, 2013.
- 5) 国土交通省:津波浸水想定の設定の手引き Ver.2.00, 2012.
- (http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/saigai/tsunami/shinsui_se ttei.pdf)
- 6) 相田勇:三陸沖の古い津波のシミュレーション, 地震研究所 彙報, Vol.52, pp.71-101, 1977.
- 7) 常田賢一: 巨大津波被害から考える盛土の粘り強さと防潮対 策としての活用, 地盤工学会誌, Vol.62, No.1, 論説, pp.2-5, 2014.