

# 内陸盛土を利用した津波多重防御に関する一考察

奥村 与志弘<sup>1</sup>・手代木 啓佑<sup>2</sup>・清野 純史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 京都大学大学院助教 地球環境学堂 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

Email: okumura.yoshihiro.8x@kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生員 京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

Email: teshirogi.keisuke.66e@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学大学院教授 地球環境学堂 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

Email: kiyono.junji.5x@kyoto-u.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震は、最大規模を念頭に国や多くの自治体が想定していた津波の高さをはるかに上回る、かつて経験したことのない規模の巨大津波を発生させた。その規模は、海岸堤防などの海岸構造物だけで内陸への氾濫を防ぐにはあまりにも大きく、氾濫流は推定で 561 km<sup>2</sup>もの広域に亘って被害をもたらした。同災害を受け、海岸堤防だけでは内陸への氾濫を防ぎきれないような巨大津波が各地で想定されるようになった。本研究では、こうした巨大津波への対策として、海岸堤防と内陸にある道路や鉄道の盛土構造物との組合せによる多重防御に注目し、その効果について数値計算を用いた基礎的な検討を行った。また、2011年東北津波における事例検討として、宮城県南三陸町志津川地区の鉄道盛土に注目して多重防御効果を評価した。

**Key Words :** inland embankment ,coastal embankment, tsunami, mitigation, optimal distance

## 1. 背景と目的

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、最大規模を念頭に国や多くの自治体が想定していた津波の高さをはるかに上回る巨大津波（以下、2011年東北津波）を発生させた。図-1は、2011年東北津波の浸水高と国や自治体が想定していた代表的なシナリオ津波（三陸北部沖、宮城県沖、明治三陸タイプ）の津波高とを比較したものである<sup>1)</sup>。特に、福島、宮城の両県に襲った津波の高さと想定とのギャップは大きく、想定2から3倍の津波が来襲していたことが分かる。さらに、その巨大さは海岸堤防などの海岸構造物だけで内陸への氾濫を防

ぐことはもはや現実的ではないほどの域に達していた。内陸に氾濫した津波は、推定で 561 km<sup>2</sup>もの広域に亘って被害をもたらした。人的被害は、戦後最大となる死者・行方不明者 18,550人（警察庁、平成25年7月10日）、震災関連死 2,688人（復興庁、平成25年3月31日）となっている。

我が国では、1959年伊勢湾台風、1960年チリ津波を経て、全国的に海岸堤防整備が進められ、その堤防の平均的な高さ 5m 程度で対処しうる外力に対しては被害抑止力を保持するようになった。しかし、1983年日本海中部地震津波で青森県を中心に各地で 5m を越える津波が来襲し、100名の津波による犠牲者を出したことを受け、ハード対策の限界が露呈した。直後に策定された「津波常襲地域総合防災対策指針（案）」の中で、防災施設で完全に津波を防ぐ必要はないとの方針が確認され、防災施設で防ぎきれない規模の津波への対策が検討された。さらに、市街地に氾濫した津波が 200名を超える人的被害をもたらした 1993年北海道南西沖地震津波を経て、1997年に先述の指針（案）を発展させた「地域防災計画における津波対策強化の手引き」が策定された。そこでは、防災施設、津波に強いまちづくり、防災体制の組合せによる対策の強化の重要性が示された。このように、これまでにも海岸堤防などの海岸構造物だけでは防ぎきれない規模の津波を想定し、ハードとソフトの組合せによる対策の強化が進められてきた。しかし、東日本大震災における津波被害の広

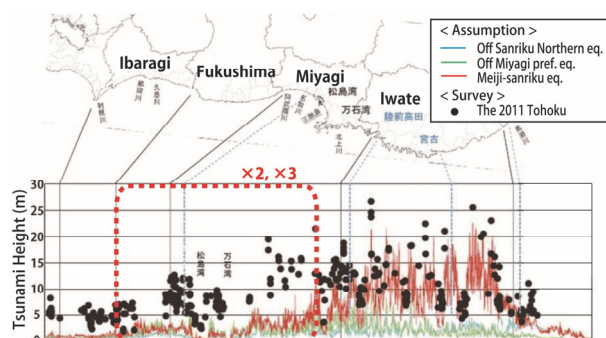


図-1 2011年東北津波と想定されていたシナリオ津波の高さの比較（平成23年防災白書<sup>1)</sup>の図を基に作成）

域性・巨大性は過去に類を見ないものであり、その重要性に対する認識はこれまでにないまでに高まっている。

こうした巨大津波に対しては、海岸構造物だけでなく、内陸にある鉄道や道路などの盛土構造物も氾濫域を減少させる役割が期待される。東日本大震災では仙台東部道路が浸水域の拡大を軽減したと考えられているが、過度の期待や十分な根拠のない期待は防災上非常に危険である。そのため、近い将来、巨大津波が想定される地域などではこうした内陸構造物の津波被害軽減効果に対して正確な理解が必要といえる。

本研究では、こうした巨大津波への対策として、海岸堤防と内陸盛土構造物との組み合わせによる多重防御に注目し、その効果について津波数値計算を用いた基礎的な検討を行う。また、2011年東北津波における事例検討として、宮城県南三陸町志津川地区の鉄道盛土に注目して多重防御効果を評価する。

## 2. 内陸盛土による多重防御効果に関する基礎的検討

### (1) 方法

本研究では、2次元問題を対象とする。沿岸の平野部を模擬した単純なモデル地形（海岸線に高さ5mの防潮堤を考慮）を用いて津波の氾濫計算をし、被災範囲を最小化する3mあるいは5mの内陸盛土の最適な位置について、津波数値計算を用いて検討する。ただし、本研究では、木造家屋が全面破壊するような被災に注目することとし、被災範囲を浸水深が2m以上になる範囲とした。また、津波による地面の洗掘や盛土の流出は考えない。

地形モデルは、図-2に示す地形を用いる。地形勾配は大阪の平野部と大阪湾を想定して、陸域は1/1000、海域は1/500とした。海域および陸域の抵抗はマニング則をもとにした抵抗項に適当なマニングの粗度係数を与えることで表現する。ここでは、小谷ほか<sup>3)</sup>に従い、海域を0.025、陸域を0.08（高密度居住区に対応）とする。盛土はのり面勾配を1:1.8、幅を6mとした。高さ3mの盛土の概略図を図-3に示す。入射波は、正弦波半波長分を図-2の海側境界から強制入力した。

津波数値計算は、非線形長波理論を staggered 格子を用いた leap-frog スキームで解いた<sup>4), 5)</sup>。空間格子間隔は2m、時間格子間隔は0.06秒とする。

### (2) 結果

#### a) 堤防間距離による被災範囲の変化

海岸堤防と内陸盛土との距離を堤防間距離とする。堤防間距離が  $d(m)$  のときの被災範囲を  $a_d$ 、内陸盛土がないときの被災範囲を  $a_0$  とし、堤防間距離  $d$  を100mから1300mまで100m間隔で変化させ、 $a_d/a_0$  の変化特性を明らかにした。なお、内陸盛土の高さは3m、入射波は周期10分、振幅10mとする。図-4

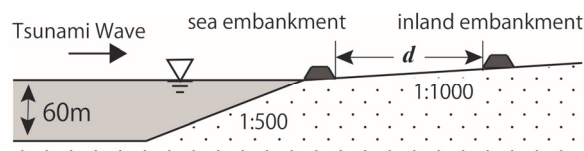


図-2 地形モデル

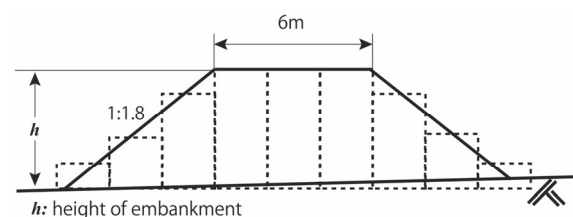


図-3 盛土の断面図

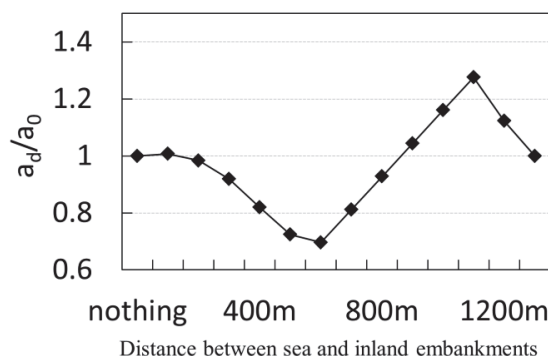


図-4 周期10分・振幅10mの津波が入射する場合の被災範囲と堤防間距離の関係

は得られた結果である。

堤防間距離が小さいうちは、内陸盛土の効果は堤防間距離が大きくなるにつれて増大する傾向にあり、600mで最大化することが分かる。それを超えると被災範囲は再び大きくなる。従って、この600mが本検討ケースにおける最適な堤防間距離であり、被災範囲を30%程度減少させる。堤防間距離が600mまでは被災範囲は内陸盛土を越えて広がっており、600m～1100mでは堤防間のみが被災範囲となる。1100mを超えると被災範囲は内陸盛土まで届かなくなる。また、堤防間距離が900m～1200mの時は堤防なしの場合よりも浸水深2m以上の範囲が広がる。これは内陸盛土がなければ、浅く広く氾濫するはずの津波が、内陸盛土が存在することで、逆に浸水深が深くなる範囲が増加してしまうためである。

#### b) 入射波の周期・振幅による最適な堤防間距離の違い

次に、入射波の周期・振幅による最適な堤防間距離の違いを調べた。内陸盛土の高さは3mとした。入射波の周期は10, 20, 30, 40, 50, 60(分)、振幅は5, 10, 15, 20(m)とした。

結果を図-5(a), (b)に示す。入射波の振幅が大きくなるにつれ最適な堤防間距離も大きくなり、入射波の周期が大きくなるにつれ最適な堤防間距離は大きくなることがわかる。これは波の振幅や波長が大

きくなることで、防潮堤を越流する海水の体積が大きくなり、被災範囲を小さくするためには、堤防間に溜められる水の量を大きくする必要があるためだと考えられる。また、振幅 5m, 周期 30 分以下の津波では被災範囲は発生しなかった。これらの結果から、津波の規模が大きくなると最適な堤防間距離は大きくなることが分かる。

### c) 内陸盛土の高さによる被災範囲の変化

内陸盛土の高さによる多重防御効果の違いを検討した。内陸盛土の高さを 5m に変え、その他は a), b) と同じ条件で解析を行い、結果を比較した(図-6)。

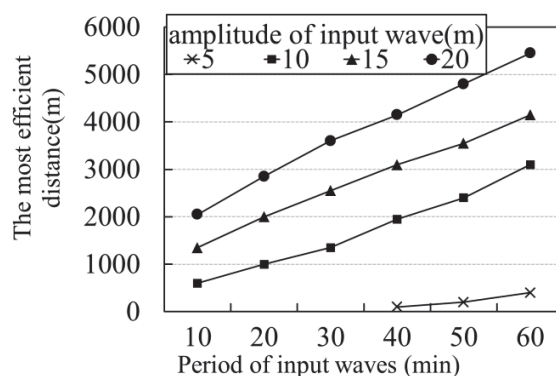
最適な堤防間距離にすれば、内陸盛土の高さが 3m のときよりも 5m のときの方が被災範囲を減少させることができ、 $a_d/a_0$  は 0.7 から 0.5 になることが分かった。これは内陸盛土が高くなったことにより、堤防間に溜められる海水の量が増えたためだと考えられる。また、最適な堤防間距離は内陸盛土の高さが 3m の時よりも 5m のときの方が短くなり、600m から 400m になった。一方で、内陸盛土の高さにかかわらず、堤防間距離が 900m~1200m の時は内陸盛土がないときに比べ被災範囲が大きくなることが分かった。

## 3. 東北地方太平洋沖地震に対する南三陸町の鉄道盛土による多重防御効果

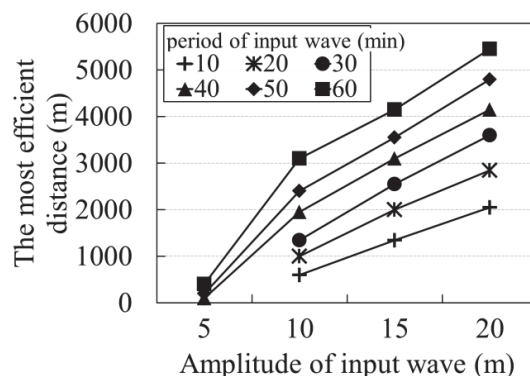
宮城県の南三陸町志津川地区は、想定に比べて非常に広い範囲が被災した。同地区は、市街地を縦断するように JR の鉄道盛土があり、海岸堤防との多重防御効果が期待される(図-7)。そこで本章では、この内陸盛土による津波被災範囲の軽減効果について、盛土がない場合と盛土がある場合の数値計算を実施することで検討する。

### (1) 計算条件

計算は、非線形長波理論を staggerd・leap-frog スキームで解いた。地形、堤防、粗度の各データは、中央防災会議資料によるデータを使用した。空間格子間隔は、1350m, 450m, 150m, 50m の 4 段階の領域を接続し(図-8)、計算時間間隔は 0.6 秒、計算時間は 6 時間とした。志津川地区の市街地を縦断している鉄道盛土は、現地での測量で高さを調べたところ約 3m であったため、計算の中では 3m の堤防とみなし、実際の位置を考慮してメッシュの境界に配置した。海岸堤防の高さは 4.6m である。堤防を越流する津波は本間の公式<sup>6)</sup>を用いて計算する。また、2011 年東北津波の波源モデルには、東北大モデル ver.2<sup>7)</sup>を用いた。地盤変位量の算出には、manshinha and smily の方法<sup>8)</sup>を用いた。これらの条件で鉄道盛土がある場合とない場合の 2 通りの解析を行い、その結果を比較した。



(a) 入射波の周期と最適な堤防間距離



(b) 入射波の振幅と最適な堤防間距離

図-5 入射波の特性と最適な堤防間距離

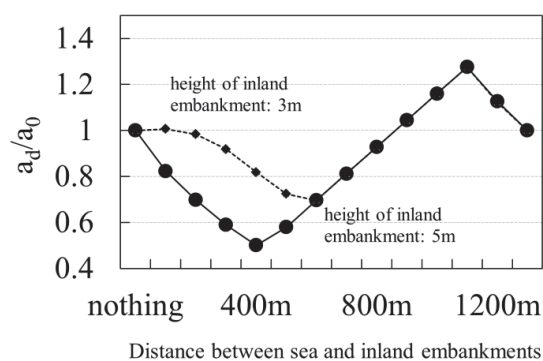


図-6 周期 10 分・振幅 10m の時の被災範囲

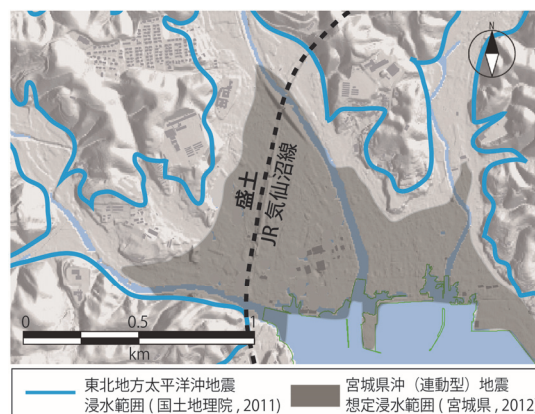


図-7 南三陸町志津川地区



## (2) 計算結果

図-9、図-10 は、それぞれ津波計算の結果として得られた津波浸水範囲と津波氾濫のスナップショットである。両図ともに(a)，(b)は、それぞれ盛土なしケース，盛土ありケースの結果である。2011 年東北津波に対しては、この志津川地区を縦断する鉄道盛土による多重防御効果は非常に小さかったことが分かる。浸水範囲に対する鉄道盛土の有無の影響は、図-9 に示す丸で囲った 3 メッシュ分だけであった。これはこの図が 50m の計算メッシュであるため、7,500 m<sup>2</sup> の差である。

志津川地区を襲った津波の卓越周期は 50 分と 80 分で振幅は 10m 程度であった。3 章の基礎的検討から、この規模の津波に対して最適な堤防間距離は 3,000m 以上と推察されるが、実際の堤防間距離は 1,000m 未満と短く、被災範囲を小さくするために最適な堤防間距離との間には大きなギャップがある。そのため、多重防御効果は非常に小さくなったと考えられる。

しかし、志津川地区の平野は海岸から 500m～1,500m 程度しか広がっていないために、3,000m もの堤防間距離を確保することはできない。志津川地区のような平野部が狭い地形では、2011 年東北津波のような巨大津波に対して内陸盛土による多重防御効果は小さくなってしまったことが分かる。しかし、2011 年東北津波の半分程度の高さであった従来の想定津波であれば、十分な効果が期待できたと考えられる。

## 4. 結論

内陸盛土の多重防御効果について、以下のことが分かった。

- (1) 被災範囲が最小になるように内陸盛土を設置すると、高さ 3m の内陸盛土で 30%程度被災範囲を減少させることができるが、最適な堤防間距離を外すとその効果は小さくなり内陸盛土がな

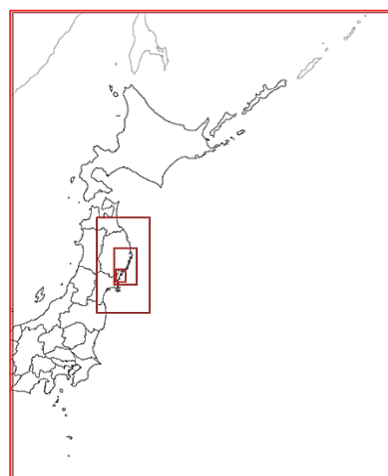
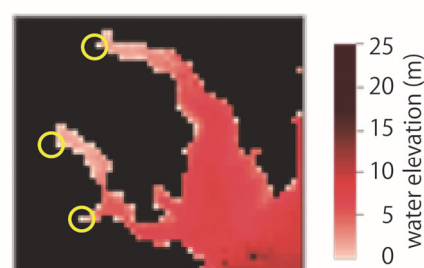


図-8 計算領域



(a) w/o railway embankment



(b) w/ railway embankment

図-9 鉄道盛土がある場合とない場合の津波浸水範囲の比較

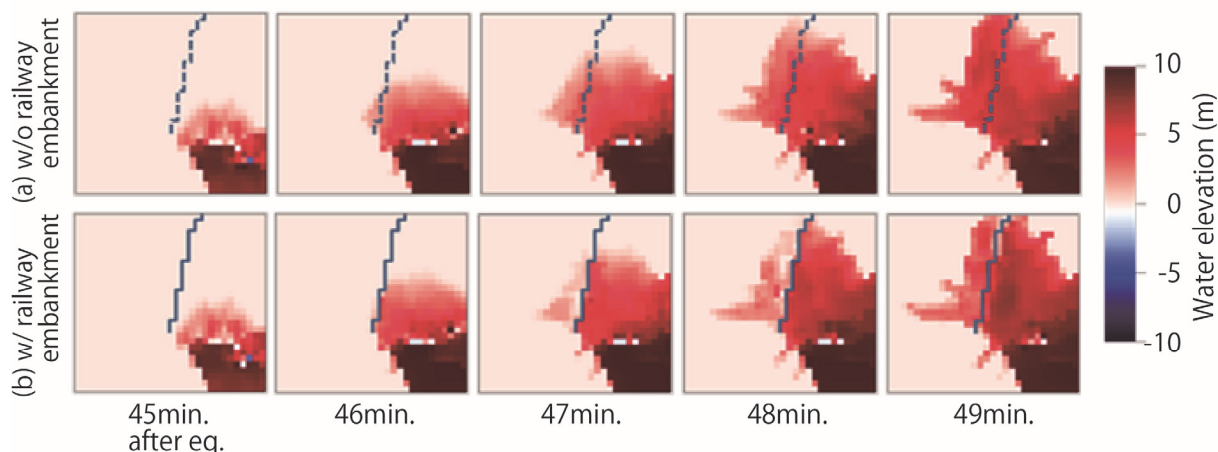


図-10 鉄道盛土がある場合とない場合の津波氾濫のスナップショットの比較

- い場合以上に被害が広がる可能性さえある。
- (2) 来襲する津
  - (3) 波の規模が大きくなると最適な堤防間距離は長くなる。
  - (4) 内陸盛土の高さを高くすると、多重防御効果はおおきくなり、最適な堤防間距離は短くなる。
  - (5) 志津川地区のような平野が狭い地形では、東北地方太平洋沖地震津波のような巨大な津波に対して内陸盛土による多重防御効果を得ることは難しい。
  - (6) 多重防御策を検討するにあたり、想定する津波の規模によって内陸盛土の位置を決めるべきであるが、来襲する津波の周期や振幅によってその効果が著しく低下する可能性があることに注意が必要である。

#### 参考文献

- 1) 内閣府：防災白書，平成23年版，2011.
- 2) 国土地理院：津波による浸水範囲の面積（概略値）について（第5報）（平成23年4月18日），  
<http://www.gsi.go.jp/common/000059939.pdf>，2013年4月12日参照，2011.
- 3) 小谷美佐，今村文彦，首藤伸夫：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp.356-360，1998.
- 4) 後藤智明・小川由信：Leap-frog法を用いた津波の数値計算法，東北大学工学部土木工学科，52p.，1982.
- 5) IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) : IUGG/IOC TIME PROJECT, Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-frog Scheme (Manuals and Guides 35), UNESCO, pp.1-24, 1997.
- 6) 本間仁：低越流堰堤の流量係数，土木学会誌，vol26, No.6, pp.635-645, 1940.
- 7) 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, [http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku\\_2011/model/dcrc\\_ver1.2.pdf](http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.2.pdf)，2012.
- 8) Mansinha, L. and D.E. Smylie : The displacement fields of inclined faults, BSSA, 61, 1433-1440, 1971.
- 9) 国土地理院：平成23年（2011年）東日本大震災2.5万分1浸水範囲概況図（宮城県版），  
<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku40017.html>，2011
- 10) 宮城県：旧志津川町の津波ハザードマップ，  
<http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kasen/ki-hm-sizugawa-tsunami.html>，2012.

## Tsunami Disaster Mitigation of Inland Embankment Structure

Yoshihiro Okumura, Keisuke Teshirogi and Junji Kiyono

The 2011 Tohoku tsunami was about 2 to 3 times larger than the assumed tsunamis in Iwate, Miyagi, and Fukushima in Japan; consequentially, coastal structures could not completely prevent damages. Therefore, in Japan, we had to take into consideration tsunami disaster mitigation by inland embankment structures. In the present study, we have studied the optimal distance between a coastal levee and an inland embankment by using some cases of tsunami inundation simulations. In the results, the following conclusions have been obtained. (1) Inland embankments can reduce the damaged area by 30% in the case of an input tsunami that lasts for 10 min and has an amplitude of 10 m. (2) A non-optimal location of the embankment reduces its mitigation effects drastically and may even increase the damaged area. (3) The optimal distance between coastal and inland embankments changes significantly if the period or the amplitude of an input wave is different.