

東北地方太平洋沖地震の際の 津波による平面道路の被害分析

板垣 治¹・丸山 喜久²

¹学生会員 千葉大学博士前期課程 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

E-mail:aaha2206@chiba-u.jp

²正会員 千葉大学准教授 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail:ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

本研究では東北地方太平洋沖地震の際の津波による平面道路被害を分析した。津波の浸水深と道路被害率の関係は地形的特徴により異なると考えられるため、被災地を地形ごとに場合分けした上で被害率を算出し、4パターンの被害推定式を提案した。さらに、東北地方太平洋沖地震の津波数値シミュレーションを行い、対象地の津波流速の特徴を把握することによって、本研究の地形区分を考察した。本研究で提案する平面道路被害推定式を用いて、最終的には南海トラフにおける巨大地震などの被害想定を行うことを目標とする。

Key Words : *The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, tsunami inundation height, damage to road, topographical characteristics*

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、青森県から千葉県にかけての太平洋沿岸部の広い範囲が津波によって浸水し、道路交通状況に大きな影響があった。浸水域では多くの道路が使用不可になり交通が麻痺した。その主原因は、道路構造物が津波の影響で使用不可になってしまう物的被害や、津波漂流物による道路閉塞などを原因とする道路交通の機能的損失である。道路交通は被災地の復旧活動のために重要であり、津波後の早急な回復が望まれる。

東北地方太平洋沖地震の津波により被災した地域は広範にわたるため、沿岸部の地形的特徴が異なっている。千葉県から宮城県までの沿岸部のほとんどは低く平らな土地で構成される低平地であるが、青森県や岩手県、宮城県の一部の三陸海岸と呼ばれる地域には、海岸に対して高くそびえる海岸段丘を有する地域や、鋸の歯のような半島と湾が入り乱れた複雑な地形であるリアス式海岸を有する地域も存在する。リアス式海岸は一般的に津波が一極集中してしまうために津波による被害が甚大になると言われている¹⁾。東北地方太平洋沖地震の際もリアス式海岸を有する岩手県大船渡市の沿岸などで15mを超えるような高い津波が観測され、壊滅的な被害をもたらした²⁾。沿岸部の地形的特徴によって、津波のもつ流れ

の特徴（浸水深と流速の関係など）が異なるものと想像され、その特徴は物的被害にも影響すると考えられる。

また政府は今後、南海トラフにおける巨大地震が高い確率で発生するとしている³⁾。この地震は、南海地震、東南海地震、東海地震の3つが連動する可能性もあるため、想定されている津波の浸水範囲も東北地方太平洋沖地震と同様に広範囲にわたり、沿岸部には複数の地形的特徴がある。

そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震の際の被災地の地理的特徴ごとに、平面道路の被害分析を行った。本研究は、地形的特徴を踏まえた被害推定式を構築することによって、今後発生が懸念される津波の際の被害推定をすることを最終目標とする。

2. 東北地方太平洋沖地震の津波による道路被害

本研究の対象地は、東北地方太平洋沖地震の津波により浸水した青森県六ヶ所村から千葉県一宮町までの太平洋沿岸の地域とする。本研究では、復興支援調査アーカイブ⁴⁾で利用可能な道路被害データ、津波の浸水深（100mメッシュ）を利用した。ただし、原発事故により立入が制限されている福島県双葉町、大熊町⁵⁾は除外した。図-1に、東北地方太平洋沖地震の震央と深水域

を示す。この範囲を対象とし、道路被害の分析を行った。

(1) 津波による道路の浸水状況

東北地方太平洋沖地震による津波で浸水した道路の延長を都道府県ごとに算出する。本研究では道路のデータとしてデジタル道路地図⁹を利用し、GIS上で100mメッシュの浸水深と空間結合し、津波によって浸水した平面道路の延長を得た（図-2）。

震源に最も近い宮城県の前線した道路の延長が2000km以上を示した。次いで岩手県、福島県の延長が長く、その後、震源から遠くなるに従い浸水した道路延長が短くなる。浸水した道路の浸水深別の延長割合を図-3に示す。岩手県では、浸水深が大きい道路延長の割合が高い。また、宮城県と福島県の浸水深ごとの道路延長の割合がほぼ同程度である。このように、道路の県別の浸水深には、その分布に違いが見られることが分かった。

(2) 津波による道路被害

復興支援調査アーカイブ⁹で取りまとめられている道路被害は、大、中、小の3ランクに大別されているが、本研究では、「道路が全面的に崩壊するか、損傷規模が

道路車線の大半におよび走行が不可能な場合」とされる大被害のみを扱った。都道府県ごとの被害件数は、青森県が1件、岩手県が533件、宮城県が1369件、福島県が346件、茨城県が13件、千葉県が2件であった。道路大被害の被災形態は、道路の亀裂、路肩部の崩壊、盛土が高い場合の盛土の崩壊、落石・土砂崩れ等、接続部の段差発生、アスファルト舗装の剥離の6つに分類することができる。被災地の中で道路大被害が多く発生した岩手県、宮城県、福島県の被害形態をまとめたものが図-4である。宮城県と福島県は被害形態ごとの割合が同程度であり、半数近くが亀裂による道路被害である。一方、岩手県は亀裂による道路被害は全体の5%ほどであり、アスファルトの剥離の割合がほかの二県に比べて高い。

また、道路被害一件あたりの延長の平均を岩手県、宮城県、福島県に関しまとめたものが図-5である。福島県の被害延長の平均が250mを超えるなど非常に大きい。岩手県の被害延長の平均は63mであり、福島県と比べると短い。このように、県ごとに道路被害の特徴が異なっているため、十分に地域を考慮した検討が必要と考えられる。



図-1 東北地方太平洋沖地震の津波による浸水域

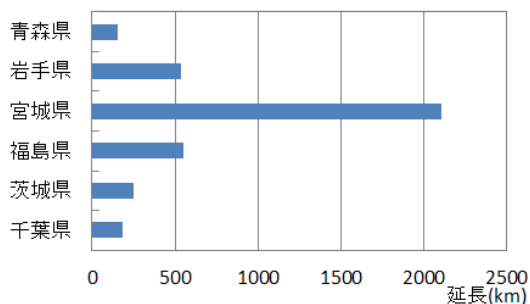


図-2 県別の浸水した道路の延長

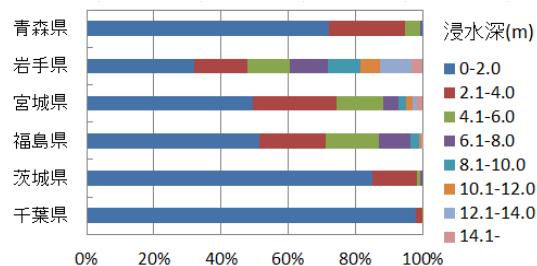


図-3 浸水した道路の浸水深の割合

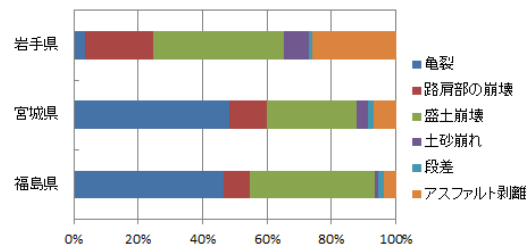


図-4 道路被害の被害形態の割合

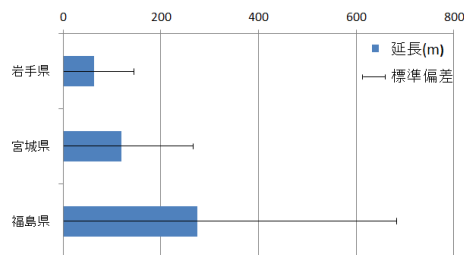


図-5 道路被害の平均延長

(3) 平面道路の被害率

大被害の件数を浸水深ごとの道路延長で除すことによって平面道路の被害率(件/km)を算出する。ここで、被害率は浸水深1mごとに集計した。

岩手県、宮城県、福島県について県別の平面道路の被害率を図-6に示す。浸水深が5m程度までの範囲では、県ごとの被害率の違いはあまり大きくない。しかし、浸水深が10m程度に達すると、とくに岩手県と福島県の間で、被害率に5倍程度の差が見られる。また、宮城県の被害率は、浸水深がおおよそ7m以上の範囲のときに、1.5~2.0件/km程度で頭打ちする傾向が見られる。

宮城県の被害率は、浸水深が約10mより小さいときには福島県の被害率と同程度の値を示す。浸水深が10m以上のときには、福島県の被害率よりは岩手県の被害率に近い値を示す。宮城県北部は岩手県沿岸部と同様にリアス式海岸を有する地域であり、宮城県南部は福島県と同様に平地を有する地域であるため、両県の被害率の特徴が重なりあったものと思われる。このように平面道路の被害率は、地形により浸水深に対する分布が異なると考えられるため、次章では地形的特徴を踏まえて系統立てた検討を行う。

3. 地形的特徴に基づく平面道路の被害分析

(1) 既往研究をもとにした三陸海岸の地形分割

東北地方の太平洋沿岸部は過去何度も津波の被害を受けてきた。青井⁷⁾は、山口による沿岸部の集落とそれが

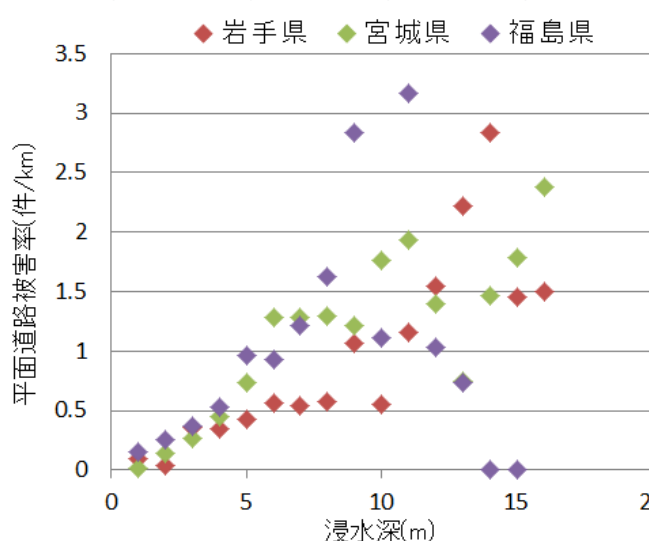


図-6 岩手県、宮城県、福島県の平面道路の被害率

位置する地形的特徴を分析した結果⁸⁾などを参考に、三陸海岸を地形的特徴ごとに第1区から第4区に分割した(図-7)。

a) 第1区

青森県尻矢崎から八戸市馬淵川までとしており、この地域を砂浜海岸と名付けている。特徴は海崖のある地域もあるが、全体的には直線の海岸で海底の傾斜も緩やかなことである。

b) 第2区

青森県八戸市馬淵川から、岩手県宮古市閉伊川までとしており、これを隆起海岸(海蝕段丘)と名付けている。特徴は広大な海岸段丘が発達していることである。海岸は直線上で狭い湾入もあるが小規模である。

c) 第3区

岩手県宮古市閉伊川から岩手県大船渡市盛川までで、沈水海岸(典型的なリアス式海岸)と名付けている。特徴は大規模なリアス式海岸であり、絶壁の迫る海岸線に近い低地に集落があることである。

d) 第4区

岩手県大船渡市盛川から牡鹿半島までとしており、沈水海岸(細やかなリアス式海岸)と名付けている。特徴は大小の湾入が入りみだれた最も複雑な地形である。また、集落が海岸から近く、低い位置に存在している。

(2) 三陸海岸の浸水地の傾斜に関する検討

平地と海岸段丘、リアス式海岸などの地形的特徴が津波の浸水域に与える影響を評価するために、本研究では陸域の傾斜について分析した。復興支援調査アーカイブ



図-7 既往研究⁷⁾の三陸海岸の地形分割

がとりまとめた浸水メッシュの標高データを用いて傾斜角を算出した（図-8）．第1区から第4区の傾斜角の割合を図-9，そのヒストグラムを図-10に示す．なお，図-10の縦軸のデータ数は100mメッシュの数を示しているため，浸水面積に対応するものである．

第1区は傾斜が1度以下の面積が90%近くを占めており，平地が大半であるとみなせる．第2区，第3区，第4区は第1区に比べて深水域の傾斜角が大きい地域の面積が広い．しかし，第4区は傾斜が0-0.5度の面積が第1区と同程度であり，平地も存在する地域であることがわかる．例えば，第4区に属する陸前高田市の中央部に存在する平野は三陸海岸では最大級である．

(3) 本研究の地形区分

青井⁷⁾による地形分割と深水域の傾斜をもとに定めた本研究の地形区分を図-11に示す．本研究では宮城県北部から青森県までの三陸海岸は青井による地域分割に従い，それ以南の宮城県南部から千葉県までは低平地とし，青井の分割方法と統合した．地形区分をまとめると以下のようなになる．

a) I：海岸段丘を有する地域

青森県階上町から，岩手県岩泉町まで．

b) II：リアス式海岸

岩手県宮古市から，岩手県大船渡市まで．

c) III：低平地を有するリアス式海岸

岩手県陸前高田市から，岩手県石巻市の一部まで．

d) IV：低平地

青森県六ヶ所村から青森県八戸市までと，宮城県石巻市の一部から，千葉県一宮町まで．

(4) 地形別の平面道路の被害率

本研究の地形区分ごとに浸水深別の平面道路の被害率を算出した（図-12）．浸水深と被害率の関係を回帰分析により評価する．回帰分析はI～IVの地形区分ごととし，関数形には式(1)を仮定した．標準正規分布の確率分布関数 $\Phi(x)$ を用いて，浸水深と被害率の関係は対数正規分布を仮定し，それに倍率 C を乗じることとした．なお， d は浸水深， P は被害率である．

$$P = C\Phi((\ln d - \lambda)/\zeta) \quad (1)$$

C ， λ ， ζ は回帰で得られる定数であり，次の目的関数 ε を最小化することで求めた．

$$\varepsilon = \sum (P_R - P)^2 w \quad (2)$$

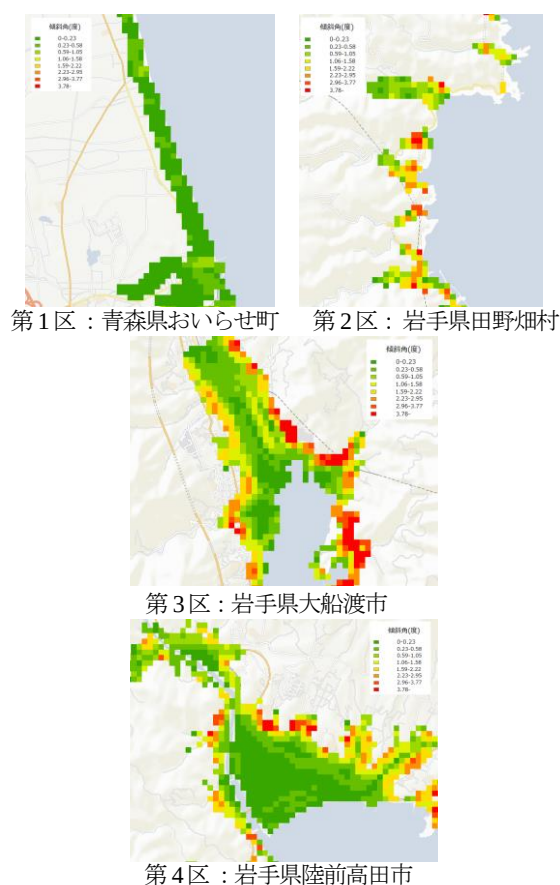


図-8 深水域の傾斜

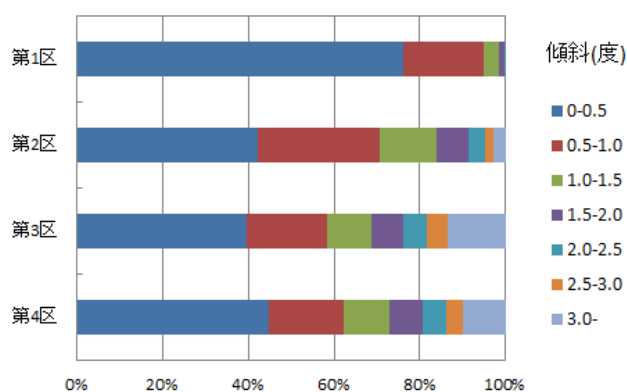


図-9 第1区から第4区の傾斜の分布

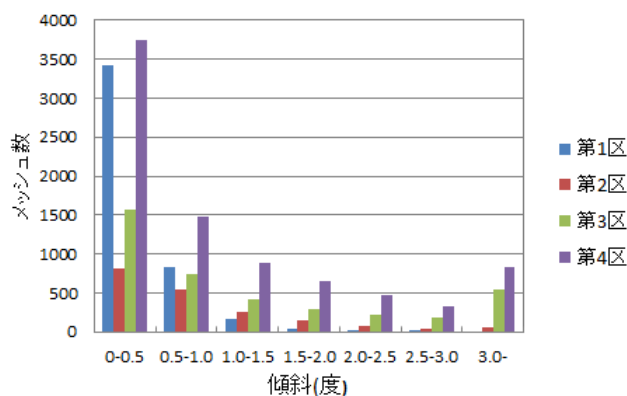


図-10 第1区から第4区の傾斜のヒストグラム

ここで、 P_R は実被害から求めた被害率であり、 w は平面道路の延長である。つまり、道路延長による重み付最小二乗法によって回帰定数を決定した。得られた回帰定数は表-1の通りである。

浸水深と平面道路被害率の関係性には、地形区分ごとに違いが見られた。浸水深が3m程度までは地形による差は大きくないが、浸水深が大きくなると被害率に違いがみられる。浸水深が5mを超えると最も被害率が高くなるのはⅢ：低平地を有するリアス式海岸である。この地域では浸水深が6m程度で被害率が頭打ちする。次いで被害率が大きいの、Ⅳ：低平地である。Ⅰ：海岸段丘を有する地域では、浸水深が6mまでの被害率は非常に小さいが、その後、被害率が急に大きくなる。Ⅱ：リアス式海岸は、浸水深が約5mで被害率が頭打ちする。

4. 津波シミュレーションによる流速の考察

本研究で定めた地形区分に関して、津波の流れの特徴を評価することを目的として、東北地方太平洋沖地震の津波数値シミュレーションを行った。

(1) 津波数値シミュレーション

数値計算は、非線形長波理論に基づく Staggered leap-frog法を用い、以下に示す連続の式と運動量保存から導かれる運動方程式（式(3)）を解く⁹⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{\frac{7}{3}}} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{\frac{7}{3}}} M \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (3b)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3c)$$

ここで、 M 、 N は x 、 y 方向の線流量、 η は水位、 h は水深、 D は全水深($=\eta+h$)、 n はマンニングの粗度係数である。

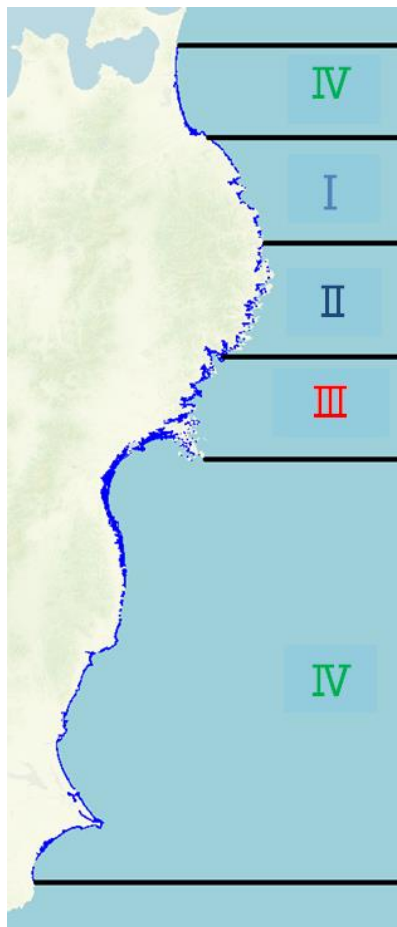


図-11 本研究の地形区分

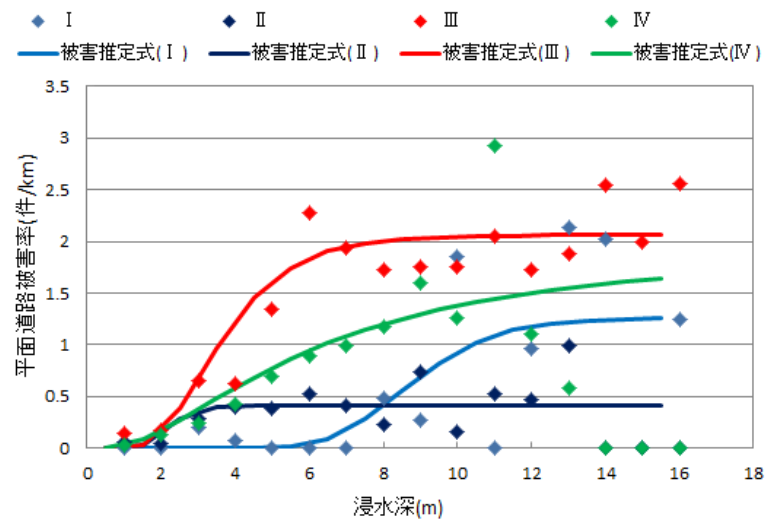


図-12 地形区分ごとの平面道路被害率

表-1 式(1)の回帰定数

地形区分	C	λ	ζ
Ⅰ	1.26	2.17	0.21
Ⅱ	0.41	0.78	0.28
Ⅲ	2.06	1.28	0.41
Ⅳ	1.87	1.79	0.81

東北地方太平洋沖地震の断層モデルには、今村らによる東北地方太平洋沖地震の津波の再現モデルである東北大学モデル(version1.2)¹⁰⁾を用いた(表-2、図-13)。

津波の遡上計算に用いるマニングの粗度係数は一様に0.025とした。また、陸域の遡上計算における最小格子間隔は50/3mとした。

地形区分ごとに津波の特徴を評価するために、各地形区分の代表的な都市を1都市選び、津波数値シミュレーションを行った。Ⅰ：海岸段丘を有する地域は岩手県田野畑村、Ⅱ：リアス式海岸は岩手県大槌町、Ⅲ：低平地を有するリアス式海岸は岩手県陸前高田市、Ⅳ：低平地は宮城県仙台市とした。

(2) 津波シミュレーションの精度

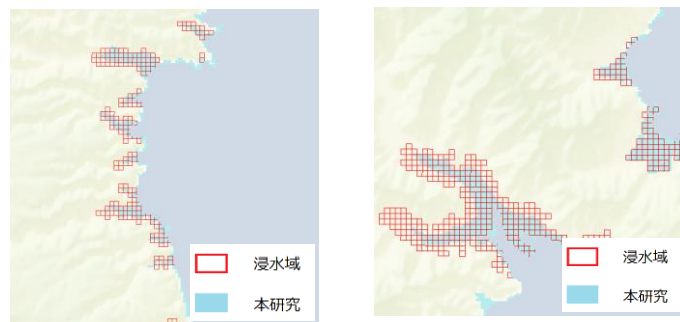
津波シミュレーションの精度を確認するために、シミュレーションで得られた深水域と復興支援調査アーカイブの深水域を比較した(図-14)。仙台市はシミュレーシ

ョンの深水域がやや広がった。陸前高田市は、シミュレーションの浸水域と復興支援調査アーカイブの深水域がほぼ等しかった。大槌町と田野畑村は、シミュレーションの深水域がやや狭かった。

津波数値シミュレーションで推定された浸水域について、シミュレーションで得られた津波高と東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる津波痕跡調査の津波高¹¹⁾を4都市に関して比較した(図-15)。田野畑村と大槌町に関してはシミュレーションの結果が過小であった。一方、仙台市と陸前高田市の津波高に関してはやや過大な評価となった。また、津波高が5m以上である全307地点のうち218地点で、実際の津波高に対するシミュレーション結果の比が0.5～1.5の範囲を示しており、約7割の地点で津波高の計算精度が倍半分に収まった。浸水域を詳細に評価するには、精度の向上を図る必要があると考えられるが、地形区分ごとに陸域の流速と浸水深を評価する本研究の目的には使用できるものと判断した。

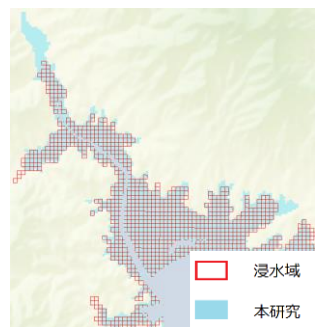
表-2 断層パラメータ¹⁰⁾

セグメント No.	lat (°N)	long (°E)	Length (km)	Width (km)	Depth (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Slip (m)
1	40.168	144.507	100.0	100.0	1.0	193.0	14.0	81.0	10.00
2	39.300	144.200	100.0	100.0	1.0	193.0	14.0	81.0	20.00
3	38.424	143.939	100.0	100.0	1.0	193.0	14.0	81.0	35.00
4	37.547	143.682	100.0	100.0	1.0	193.0	14.0	81.0	10.00
5	36.730	143.070	100.0	100.0	1.0	193.0	14.0	81.0	7.50
6	40.367	143.394	100.0	100.0	24.2	193.0	14.0	81.0	1.00
7	39.496	143.100	100.0	100.0	24.2	193.0	14.0	81.0	3.00
8	38.620	142.853	100.0	100.0	24.2	193.0	14.0	81.0	4.00
9	37.744	142.609	100.0	100.0	24.2	193.0	14.0	81.0	2.00
10	36.926	142.009	100.0	100.0	24.2	193.0	14.0	81.0	2.00

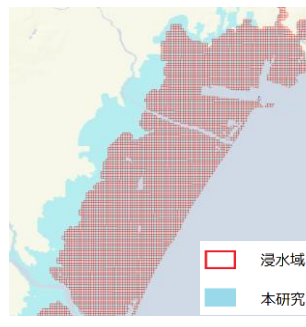


Ⅰ：田野畑村

Ⅱ：大槌町



Ⅲ：陸前高田市



Ⅳ：仙台市

図-14 数値シミュレーション結果と復興支援調査アーカイブの深水域の比較

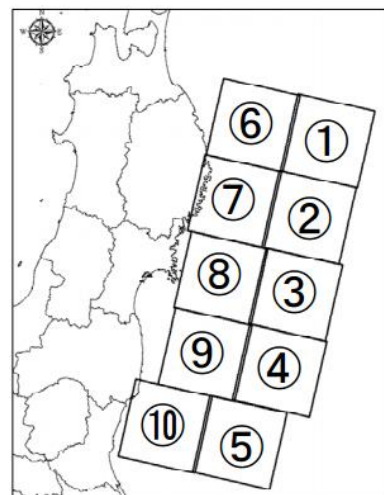


図-13 東北地方太平洋沖地震の断層モデル¹⁰⁾

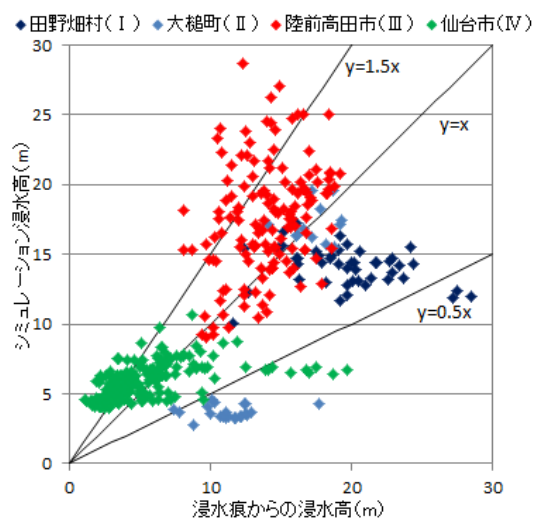


図-15 浸水高の計算値と観測値の比較

(3) 津波流速と浸水深の関係

数値シミュレーションで得られた4都市の流速を図-16に示す。また平面道路の大被害が発生した場所について浸水深と最大流速の関係性を都市ごとに線形近似したものが図-17である。Ⅰ：海岸段丘を有する地域に属する田野畑村は浸水深が大きくなるに従い流速が大きくなる。Ⅱ：リアス式海岸の大槌町は、標準誤差が他の地形区分のものよりも大きい、浸水深が大きくなっても流速があまり大きくならない傾向にある。平面道路の被害率（図-12）も浸水深が4m程度で頭打ちする傾向があり、流速が浸水深に依らずあまり大きくならないことが反映されたものと考えられる。

Ⅲ：低平地を有するリアス式海岸である陸前高田市は、浸水深が5m以下でも流速が大きく、浸水深が10m以上では流速が非常に大きい。この地形区分の平面道路被害率（図-12）は、ほかの地域と比較して全体的に被害率が高く、流速が全般的に大きいことが原因と考えられる。Ⅳ：低平地である仙台市は、浸水深に対する流速の増加量が大きく、浸水深が5mから10mではほかの地形区分に比べ流速が大きかった。平面道路の被害率（図-12）は、

浸水深5-10mでは、Ⅰ、Ⅱより被害率は高くなっており、津波の流れの持つ特徴がある程度反映されている。

5. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震の津波による道路被害を地形的特徴を踏まえて分析した。既往研究や浸水域の傾斜角の分析結果をもとに、4つの地形区分を定めた。

この地形区分の有効性をより詳しく検証するために、津波数値シミュレーションを行い、浸水深と流速の関係を通じて津波の流れの特徴を整理した。その結果、浸水深と流速の関係に地形区分ごとの特徴を見ることができ、この結果をもとに平面道路の被害率と浸水深の関係性について考察することができた。

更なる検証のためには、津波数値シミュレーションの精度を高めるとともに、道路被害形態を考慮し、平面道路被害を分析することが必要であると考えられる。また、今後は南海トラフ地震への適用に関する検討を行うことを予定している。

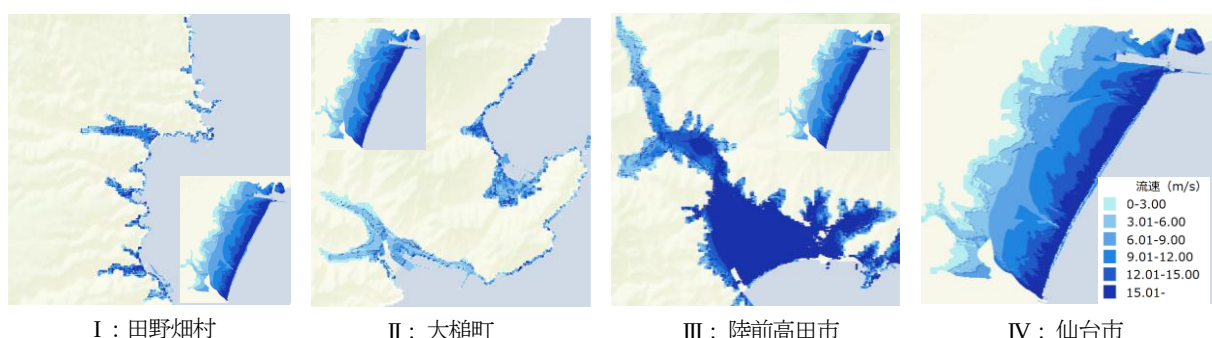


図-16 津波数値シミュレーションによる最大流速分布

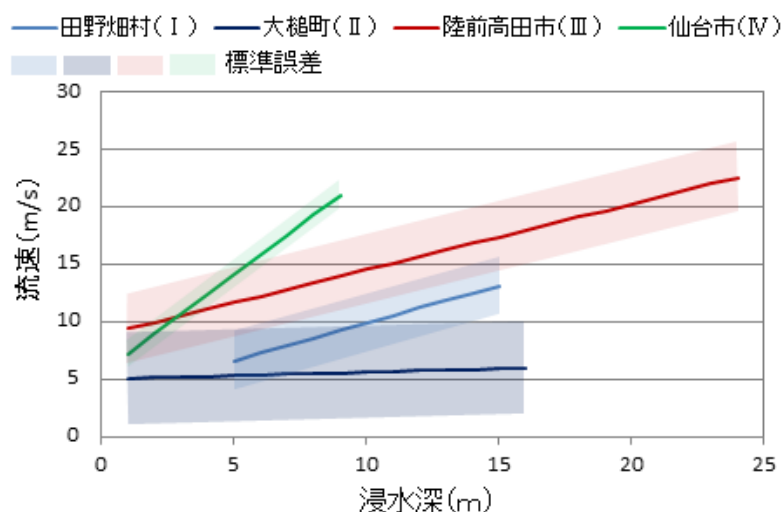


図-17 平面道路大被害周辺の最大流速と浸水深の関係

参考文献

- 1) 川崎浩司：津波の基本特性と東北地方太平洋沖地震による津波災害，混相流，Vol. 26, No. 1, pp. 11-18, 2012.
- 2) 気象庁：気象庁技術報告 第133号，2012年，
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/gizyutu/133/gizyutu_133.html
- 3) 内閣府：防災情報のページ，
<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/>
- 4) 首相官邸：福島原発事故-福島原発・放射能に関する最新情報，
<http://www.kantei.go.jp/saigai/anzen.html>.
- 5) 東京大学空間情報科学研究センター：復興支援調査アーカイブ，
<http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>.
- 6) 一般財団法人 日本デジタル道路地図協会：デジタル道路地図，
<http://www.drm.jp/>
- 7) 青井哲人：三陸海岸の集落 災害と再生：1896, 1933, 1960,
<http://d.hatena.ne.jp/meiji-kenchikushi/2001110/p1>.
- 8) 山口弥一郎：津波と村，三弥井書店，2011.
- 9) Koshimura, S., Imamura, F., and Shuto, N.: Characteristics of on-slope tsunami propagation and the accuracy of the numerical model, *Tsunami Research at the End of a Critical Decade*, pp.163-177, 2001.
- 10) 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター：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/drc_ver1.2.pdf
- 11) The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group: Nationwide field survey of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake tsunami, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B2*, Vol. 67, No. 1, pp. 63-66, 2011.

?

DAMAGE RATIO OF REGIONAL ROAD DUE TO THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI

Osamu ITAGAKI and Yoshihisa MARUYAMA

This study investigates the relationship between the damage ratios of regional roads and tsunami inundation depths after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. This study focuses on the damage incidents to the roads excluding elevated roads, bridges, and tunnels, and the damage ratios are defined as the number of damage incidents per kilometer. The damage dataset compiled by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport was employed in this study. According to the results, four kinds of fragility functions for regional roads are proposed considering the differences of topographical features. The classifications are validated due to the results of numerical simulation of tsunami propagation.