津波避難行動でのマクロ的な人的被害評価における 道路閉塞条件の考え方

Consideration on Street Blockades for Evaluation of Human Damage in Tsunami Evacuation

○藤田 謙一¹,矢代 晴実² Ken-ichi FUJITA¹ and Harumi YASHIRO²

1千代田化工建設(株)

Chivoda Corporation

2防衛大学校システム工学群建設環境工学科

Department of Civil and Environmental Engineering, National Defense Academy.

More than 20,000 peoples was damaged in the Great East Japan Earthquake dated on March 11, 2011. About 90% of the damaged population was caused by the tsunami after the earthquake. By learning a lesson from the tsunami disaster, planning and measurement for tsunami evacuation have been carried out by municipality located by coastal areas. The authors have proposed an evaluation method of human damage in tsunami evacuation using area-wide mesh. In the evaluation, variances of walking speed and tsunami run-up speed are considered. However, in the method, effect of street blockades by collapse of buildings, scattering of rubbles and fire is not included. In this study, a consideration method in the evaluation of human damage using the area-wide mesh taking accout of the street blockades is discussed.

Keywords: Evacuation from tsumami, Human damage, Earthquake damage estimation, Street blockades, Area-wide mesh, Walking speed

1. はじめに

東日本大震災での大津波による甚大な人的被害を受けた被災地域では、地域の復旧および今後の備えを見据えた復興が進められている。一方、今後の発生が予想されている南海トラフ巨大地震による津波被害の想定地域では、被害想定を見直した上、防災対策を推し進めている。 津波に対する被害想定では、津波からの避難における人的被害評価を行なっている。

津波避難における人的被害の評価においては、地震発 生から避難先への移動に要する時間と避難先に津波が到 達するまでの時間の考え方が重要である。地震動が大き い場合は,建物の倒壊,瓦礫の散乱,火災の発生などに より道路(避難路)が閉塞されることが十分に考えられ る。津波避難における人的被害の評価方法は、地域メッ シュを用いて被害人口をマクロ的に評価する方法、およ び数値解析法を用いて被害人口を詳細に評価する方法に 大別することができる。避難における人的被害評価に道 路閉塞の影響を考慮する際,数値解析法を用いて評価す る場合は、避難路に道路閉塞の影響を設定することが可 能である。一方、地域メッシュを用いる場合、避難距離 は一般にメッシュ中心間の距離に係数を乗じて算出する ため, 道路閉塞の影響を考慮するには, 歩行速度の低減 を適切に評価することが重要となる。なお、著者ら1),2)は、 地域メッシュを用い、歩行速度と津波遡上速度のばらつ きを考慮する人的被害の評価方法を構築しているが、道 路閉塞の影響を考慮していない。

本研究では、内閣府・自治体、および既往研究における道路閉塞の考え方を整理し、著者ら 1,2)の方法を含め、地域メッシュを用いる人的被害評価に道路閉塞の影響を

含める際の方法を考察する。

2. 津波避難におけるマクロ的な人的被害評価の概要

津波避難における人的被害評価の例として、著者ら1),2)

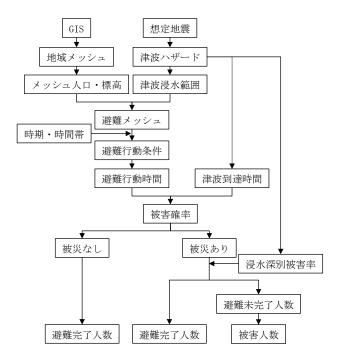


図1 人的被害の評価フロー

表1 地震による道路閉塞の考え方

道路閉塞要因	中央防災会議3),4)	高知県 ⁵⁾	静岡県 ^{6),7)}	神奈川県8)	既往研究
道路幅員	阪神・淡路大震災の データを用いて、幅 員別に道路閉塞率を 算定。 道路閉塞率の算定に おいては、建物倒壊 率を考慮。	中央防災会議と同じ 方法。	緊急輸送路を対象と し,震度7での建物倒 壊により,中規模な 道路閉塞が発生する と仮定。	中央防災会議と同じ 方法。	道路幅と建物(家 屋)の倒壊の関係か ら道路閉塞を判断 ⁹ 。
揺れによる 建物倒壊	木造と非木造を建設 年代別に分類したフ ラジリティ曲線を作 成して評価。		兵庫県南部地震での 建物被害データに基 づくフラジリティ曲 線を用いて評価。	木造の評価では中央 防災会議のデータを 用い,非木造の評価 では兵庫県南部地震 に基づくフラジリ ティを用いて評価。	兵庫県南部地震の データ, 兵庫県南部 地震以降のデータを 用いるなど多様であ る。
液状化による 建物倒壊	木造と非木造を建設 年代ごとに分類し, 沈下量と倒壊率の関 係を表すフラジリ ティを用いて評価。	中央防災会議と同じ 方法。	中央防災会議と同じ 方法。	中央防災会議と同じ 方法。	液状化指数PL値35以 上で避難路が埋没 し,道路使用不可と する ¹⁰⁾ 。
建物倒壊による 瓦礫の広がり	扱っていない。	扱っていない。	扱っていない。	扱っていない。	瓦礫流出幅は建物高 さと同じ ^{11),12)} 。 瓦礫流出幅は建物高 さの半分 ¹³⁾ 。 瓦礫流出幅を確率的 に評価 ^{14),15)} 。
建物火災	①建物倒壊しない場合 合とは はない電の はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないがい はないに ないに はない はないに はない はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに はないに	中央防災会議と同じ 方法。	中央防災会議と同じ 方法。	中央防災会議と同じ	幅員10m以下かつ延焼 建物からの距離が5m 以下の道路は閉塞す ると仮定 ¹²⁾ 。
被害評価方法	地域メッシュ	地域メッシュ	地域メッシュ	地域メッシュ	道路ネットワークを 用いるシミュレー ション ⁹⁾⁻¹⁵⁾

の評価フローを図1に示し、著者らの人的被害評価の概要 を以下に記す。なお、評価において、避難方法は徒歩で あり、道路閉塞の影響は考慮していない。

- ①地域をメッシュ分割する。メッシュサイズは 250m×250mである。
- ②各メッシュに人口構成および標高を設定する。なお、 本研究ではGISデータを用いる。
- ③避難先のメッシュを選定する。
- ④避難メッシュから避難先までの道程と距離を設定する。
- ⑤地震発生から海岸線までの津波到達時間および波高を 設定する(想定値を用いる)。
- ⑥ハザードマップのデータに基づき, 各メッシュの浸水 深を設定する。
- ⑦海岸線から避難先までの津波遡上流速の平均値を求め, 地震発生から避難先に津波が到達する時間に関する確 率密度関数を求める。
- ⑧メッシュごとに避難意識を高い、中間、低いの3段階で設定する。避難意識に対する人口割合は、直接避難、用事後避難、切迫避難、避難しないの4つについて設定する。
- ⑨年代別の歩行速度の平均値とばらつきを用いて、避難 開始から避難先に到着するまでの時間に関する確率密

度関数を求める。

⑩津波到達時間と避難時間の関係から避難において津波 に巻き込まれる確率(被害確率)を求める。この値に メッシュの浸水深ごとの津波被害関数を乗じ,さらに メッシュの人口を乗じて,人的被害を求める。

3. 既往研究における道路閉塞の考え方の整理

国および自治体の地震および津波に対する被害想定に おいては,道路閉塞の要因に対する基本的な考え方およ び算定方法を示して,被害を推計している。

本研究では、津波避難における人的被害の評価を行う際、避難行動は地震動終了後に開始し、地震による建物倒壊などにより道路が閉塞されているものとして、避難における歩行速度低減の方法を考察する。以下では、地震時を対象に、内閣府(中央防災会議^{3),4))}と自治体(高知県⁵⁾、静岡県^{6),7)}、神奈川県⁸⁾)の被害想定、および既往研究⁹⁾⁻¹⁵⁾における道路閉塞の要因である道路幅員、建物倒壊、建物火災および瓦礫の広がりの考え方を整理する。また、道路閉塞の考え方の概要は表1に示した。なお、道路閉塞要因には、ブロック塀の転倒、自動販売機の転倒、建物屋外の落下物があるが、内閣府と自治体および既往研究での避難を対象とした評価にほとんど用い

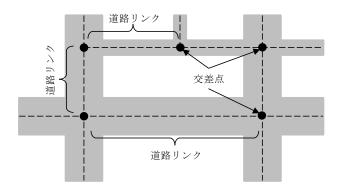


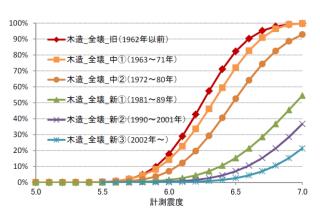
図2 道路リンクの考え方

られてないため省略することとした。

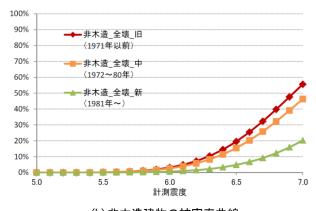
(1)道路幅員

中央防災会議⁴の被害想定では,阪神・淡路大震災での調査データに基づいて作成された家屋の倒れ込みによる道路リンク(交差点間の道路を1つのリンクとする)の閉塞率をメッシュごとに作成している。図2に道路リンクの考え方を示す。幅員13m以下の道路を対象に,幅員3m未満,3m以上5.5m未満,5.5m以上13m未満に分別し,各々について道路閉塞率をメッシュ別に算定している。閉塞率は道路幅員ごとに建物被災率(全壊率+1/2×半壊率)を用いて算定している。高知県⁵⁾および神奈川県⁸⁾は中央防災会議の考え方を用いている。静岡県⁷⁾は,緊急輸送路を対象に,震度7での建物倒壊による道路閉塞の影響を想定している。

既往研究において、伊藤ら⁹は、道路幅ごとに完全閉 塞の条件を設定し、幅員3m未満では道路片側の家屋が倒



(a) 木造建物の被害率曲線



(b)非木造建物の被害率曲線 図3 建物の被害率曲線(文献3)より)

壊,3m以上6m未満で道路を挟んで対面する家屋が倒壊,6m以上では両側の家屋が倒壊しても通行に支障を及ぼさないとしている。

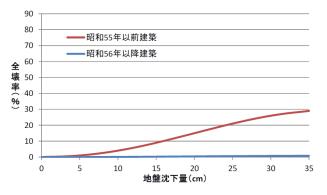
(2)揺れによる建物倒壊

中央防災会議3の被害想定では、木造と非木造を建設年代ごとに分類し、図3に示す計測震度と倒壊率の関係を表すフラジリティを作成して建物倒壊率を算定している。高知県50は中央防災会議のフラジリティを用いている。静岡県60は、兵庫県南部地震の被害データに基づいて作成されたフラジリティを用いている。神奈川県80は、木造の評価は中央防災会議のフラジリティを用い、非木造の評価には兵庫県南部地震の被害データを反映したフラジリティを用いている。

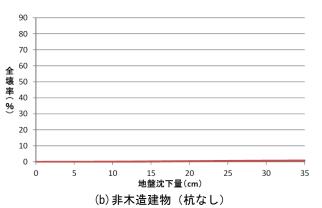
既往研究においては、兵庫県南部地震の建物被害データ、兵庫県南部地震以降の建物被害データを用いるなど 多様である。

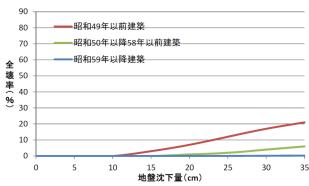
(3)液状化による建物倒壊

中央防災会議3)の被害想定では、揺れによる建物倒壊



(a)木造建物





(c) 非木造建物(杭ありの小規模建物) 図 4 地盤沈下量に対する建物全壊率曲線 (文献 3) より)

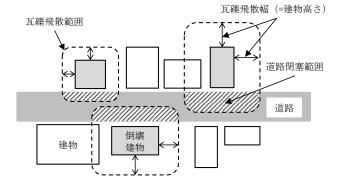


図5 瓦礫流出幅と道路閉塞

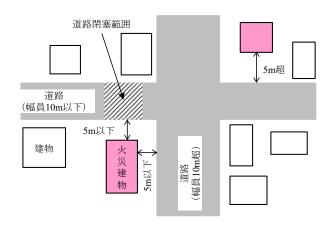


図6 建物火災と道路閉塞

と同様に木造と非木造を建設年代ごとに分類し、図4に示す沈下量と倒壊率の関係を表すフラジリティを用いて建物倒壊率を算定している。高知県5と静岡県5は中央防災会議のフラジリティを用いている。神奈川県8では、東日本大震災における液状化発生状況を反映した結果を用い、メッシュごとの液状化指数 (PL値) に応じて設定された液状化面積率を用いて全壊棟数と半壊棟数を算定している。

既往研究において、村上ら¹⁰は、液状化による道路の 沈下量が30cm以上になると噴砂等で避難路が埋没すると 考え道路が使用できなくなるとし、指標としてPL値35以 上としている。

(4)建物倒壊による瓦礫の広がり

内閣府および自治体の被害想定おいて,瓦礫の広がり は扱われていないが,道路閉塞率は建物倒壊率(前項(1)) を用いて評価できると考えられる。

既往研究において,建物倒壊による瓦礫の広がりを評価する方法は確立されていない。このため,道路閉塞率はつぎの考え方を用いて算定している。

市川ら¹¹⁾および大佛ら¹²⁾は、瓦礫流出幅は建物高さに一致するとしている。図5に瓦礫流出幅と道路閉塞の関係を示す。長谷川¹³⁾らは、阪神淡路大震災での神戸市六甲道地区の実態に基づき、建物高さの半分としている。赤倉ら¹⁴⁾は道路リンクの瓦礫分布幅は正規分布に従うと仮定し、震度ごとに平均値と標準偏差を設定している。表2に道路リンクと瓦礫幅の確率分布を示す。今泉ら¹⁵⁾は、瓦礫幅分布は指数分布と従うと仮定し、木造建物の老朽度および木造住宅率を考慮して道路閉塞の確率モデルの推定式を提案している。

表 2 瓦礫幅の確率分布(文献 14) より) (a) 道路両側からの瓦礫幅の確率分布

震度	平均值	標準偏差
5	0m	0m
6	-0.82m	0.57m
7	1.27m	3.14m
7超	4.48m	3.29m

(b) 道路片側からの瓦礫幅の確率分布

震度	平均値	標準偏差
5	0m	0m
6	-0.41m	1.11m
7	0.63m	2.22m
7超	2.24m	2.33m

(5)建物火災

中央防災会議³)では、出火、消防運用、および延焼の3つに対して被害想定が実施されている。出火では、①建物倒壊しない場合の火気器具・電気器具による出火、②建物倒壊した場合の火気器具・電気器具による出火、③電気器機・配線からの出火に対する考え方が示されている。消防運用では、消防力と阪神・淡路大震災の実績に基づきマクロ的に消火可能件数を算定する考え方を示している。延焼では、消防運用の結果、消火できなかった火災件数を用い焼失棟数を推定する考え方を示している。高知県⁵)と静岡県⁶は、中央防災会議と同じ考え方と手法を用いて算定している。神奈川県⁵)の考え方は中央防災会議と同じであるが、具体的な算定方法は異なる。しかしながら、以上の被害想定において、火災による道路閉塞は触れられていない。

既往研究において、大佛ら¹²⁾は、幅員10m以下かつ延焼建物からの距離が5m以下の道路は閉塞すると仮定している。大佛らの火災による道路閉塞モデルを図6に示す。

4. マクロ的な人的被害評価における道路閉塞と 歩行速度の考え方

地震被害想定における道路閉塞の考え方には、地域メッシュを用いてマクロ的に評価する内閣府³),4)・自治体⁵)8)の手法とGISなど地図情報に基づく道路ネットワークモデルを用いて詳細に評価する既往研究⁰,15)の手法がある。両手法の間に評価方法の違いはあるが、基本的な考え方は同じである。道路閉塞はネットワークモデル内に直接指定することができる。しかし、地域メッシュを用いた津波避難における人的被害評価において、避難距離はメッシュ中心間の直線距離の係数倍で表し、詳細な道路情報は表現されにくい。地域メッシュを用いる人的被害評価では、メッシュ内の道路情報と建物倒壊、建物火災などの関係により道路閉塞率を適切に評価し、道路閉塞率に応じた歩行速度の評価が重要になる。なお、内閣府・自治体の被害想定では、避難において道路閉塞を考慮した人的被害評価の実績は少ない。

以下では、メッシュを用いる場合の人的被害評価における歩行速度の低減方法のひとつの考え方として、中央防災会議および既往研究を参考に、建物倒壊による道路 閉塞を考慮した場合の歩行速度を低減する方法を試みる。

(1)道路閉塞率

メッシュ別の道路閉塞率は、中央防災会議⁴⁾に示されている算定式を用いて次式で表す。

$$R_b = \frac{\sum_{i=1}^{n} (L_{ri} \cdot R_{bri})}{\sum_{i=1}^{n} L_{ri}}$$
 (1)

ここに、 R_b はメッシュの道路閉塞率(%)、 L_n は道路リンク(交差点間(図2参照))iの長さ、 R_{bri} は道路リンクiの道路幅員閉塞率(%),iは道路リンク番号、nはメッシュ内の道路リンク数である。また、 R_{bri} は道路リンクiの建物被災率 D_{rbi} (%)を用いて、それぞれ次式で表される

・幅員3m未満の道路

$$R_{bri} = 1.28D_{rbi} \tag{2a}$$

・幅員3m以上5.5m未満の道路

$$R_{bri} = 0.604D_{rhi} \tag{2b}$$

・幅員5.5m以上13m未満の道路

$$R_{bri} = 0.194D_{rbi} \tag{2c}$$

なお, Drbiは次式で与えられる。

$$D_{rbi} = D_{di} + \frac{1}{2} D_{pdi} \tag{3}$$

ここに、 D_{di} は道路リンクiの建物の全壊率、 D_{pd} は道路リンクiの建物の半壊率であり、それぞれ建物被害のフラジリティ曲線から求めることができる。

(2)道路閉塞時の有効平均幅員

メッシュの道路閉塞率を用いて、有効平均幅員を求める。 メッシュの平時における平均幅員 B_a は、次式で表すこと ができる。

$$B_{a} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (L_{ri} \cdot B_{ri})}{\sum_{i=1}^{n} L_{ri}}$$
(4)

ここに、 B_{ri} は道路リンク L_{ri} における道路幅である。

地震時のメッシュの有効平均幅員 B_e は、 B_a に道路閉塞率 R_b を乗じた値になると仮定すれば、次式で表すことができる。

$$B_e = R_b \cdot B_a \tag{5}$$

(3)メッシュの歩行速度

メッシュの歩行速度は田村ら¹⁶の考え方を用いて評価する。田村らは、避難行動における道路幅員の歩行可能性を判定する指標が定められていないことから、赤倉らの瓦礫幅の確率分布を用いて、瓦礫のない幅員(有効幅員)と歩行速度の関係を設定している。表3に有効幅員と歩行速度の低減率を示す。

歩行速度は(4)式により求めた B_e に応じて歩行速度低減率を考慮して求める。

以上により、道路閉塞を考慮した人的被害想定において、避難開始から避難完了までの歩行速度は、メッシュごとの設定値を用いて評価可能であると考えられる。ただし、著者らの方法における歩行速度は、正規分布を仮定しているため、歩行速度が低減する際のばらつきの考え方が課題である。

なお、液状化による歩行速度低減について、愛知県¹⁷⁾ は津浪避難シミュレーションの実施において、PL値の大 きさに応じて、歩行速度低減率を設定している。表4に PL値と歩行速度低減率を示す。

表 3 道路有効幅と歩行速度低減率(文献 16) より)

有効幅員	歩行速度低減率	
1.5m以上	1.0	
0.5m~1.5m未満	0.5	
0.5m未満	0	

表 4 液状化指数 (PL値) と歩行速度低減率 (文献 17) より)

PL値	歩行速度低減率
15以下	1.0
15超	0.65

5. まとめ

本研究では、著者らの津波避難における人的被害評価に、地震時における道路閉塞の影響を考慮することを目的に、内閣府・自治体の被害想定および既往研究における道路閉塞の考え方を調査し整理した。地域メッシュを用いる際の考え方を考察した。

本研究で調査した範囲内における道路閉塞の考え方を以下にまとめる。

- (1)被害想定と既往研究ともに道路閉塞を評価する方 法は多様であるが、基本的な考え方はほぼ同じで ある。
- (2) 地震および地震火災による道路閉塞は,建物被害に関係する。津波からの避難における人的被害評価では,道路閉塞を考慮することが重要である。
- (3) 内閣府・自治体の被害想定は、広域範囲の地域を対象とするため地域メッシュを用いて行っている。 既往研究では、道路ネットワークモデルを用いて、 道路ごとの閉塞状況をモデルに反映した評価を実施している。
- (4) 内閣府・自治体の避難における人的被害想定では、 地震による道路閉塞を考慮した実績は少ない。一 方、既往研究では、津波避難において道路閉塞の 影響を考慮した人的被害の評価が行われている。

今後は、被害想定および既往研究における道路閉塞の考え方を用いて、地域メッシュを用いる津波避難における人的被害評価を行う予定である。また、地震による道路閉塞は、建物被害と関係することから、地震による建物被害および津波避難における人的被害を組み合わせた地域の地震・津波リスク評価に拡張する計画である。

参考文献

- 1)藤田謙一, 矢代晴実: 地域メッシュを用いた津波避難施設の 設置数と設置場所の検討, 土木学会論文集 F6 (安全問題) 特集号, Vol.72 No.2, pp.I_151-I_156, 2016.
- 2) Fujita K., Yashiro.H.: Evaluation of Human Damage in Tsunami Evacuation Considered the Variance of Walking and Tsunami Runup Speeds, Int. J. of Social Management Systems, Issue 11, Vol.1, sms17-8200, pp.213-223, 2017.
- 3) 中央防災会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ: 南海トラフ巨大地震の被害想定について (第一次報告), 2012.
- 4) 中央防災会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググル ープ:南海トラフ巨大地震の被害想定について (第二次報

告), 2013.

- 5) 高知県 南海トラフ地震対策課: [高知県版] 南海トラフ巨 大地震による被害想定の概要、2013.
- 6) 静岡県 危機管理部危機政策課: 静岡県第4次地震被害想定 (第一次報告), 2013.
- 7) 静岡県 危機管理部危機政策課: 静岡県第4次地震被害想定 (第二次報告), 2013.
- 8) 神奈川県 地震被害想定調査委員会: 神奈川県地震被害想定調査, 2015.
- 9) 伊藤恵理,川瀬博,松島信一,畑山満則:予測強震動を用いた建物倒壊想定に伴う道路閉塞を考慮した津波避難シミュレーション,日本地震工学会論文集,第15号,第5巻(特集号),pp.17-30,2015.
- 10)村上啓介,前原翔太,椎葉倫久:浸水域の時間的広がりと地盤の液状化を考慮した津波避難困難エリアの抽出に関する研究,土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, pp.I_707-I_702, 2015.
- 11)市川総子,阪田知彦,吉川徹:建物倒壊および道路閉塞のモデル化による避難経路の危険度を考慮した避難地への到達可能性に関する研究,GIS-理論と応用,Vol.12,No.1,pp.47-56,

2004.

- 12)大佛俊泰, 沖拓弥: 密集市街地における大地震時の避難困難率について, 日本建築学会計画系論文集, 第77巻, 第681号, pp.2561-2567, 2012.
- 13)長谷川究,小早川悟,稲垣具志,後岡寿成:大規模地震時に おける建物倒壊を考慮した避難所へのアクセス性に関する研 究,交通工学論文集,第3巻,第2号(特集号A),pp.A_287-A_294,2017.
- 14)赤倉康寛,高橋宏直,中本隆:郡市臨海部地震被害予測のための街路閉塞現象のモデル化の試み,港湾技術研究所報告,第39巻,第3号,pp.19-41,2000.
- 15)今泉恭一, 浅見泰司: 震災時の道路閉塞推定に関する研究 -防災街づくりのための密集住宅市街地整備方策の定量的比 較分析一, 日本建築学会計画系論文集, 第529号, pp.225-231, 2000.
- 16)田村保,西畑剛,森屋陽一,瀧本浩一,三浦房紀:街路閉塞 を考慮した津波浸水時の避難シミュレーション手法の適用, 海岸工学論文集,第52巻,pp.128-1290,2005.
- 17)愛知県 防災局:市町村津波避難計画策定指針(津波シミュレーション結果), 2017.