

地震力と津波波力を同一指標で表した損傷度曲線の提案 —ガソリン供給施設への適用に向けて—

Proposal of Vulnerability Functions for Oil Refineries taking into account
both Ground Shaking and Tsunami Force

佐伯 琢磨¹, 清野 純史²

Takuma SAEKI¹ and Junji KIYONO²

¹ 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門

Social System Research Department, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

² 京都大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Kyoto University

The Great East Japan Earthquake exerted serious damage over an unprecedentedly wide range. The earthquake prevented the supply of materials indispensable to restoration and revival in its aftermath, including fuels such as gasoline. In this study, the method to estimate a supply delay of gasoline for a hypothetical Nankai Trough Earthquake is proposed. In this method, we developed vulnerability functions of oil refineries which took into account both ground shaking and tsunami force simultaneously.

Keywords: Earthquake, Tsunami, Gasoline, Delay of supply, Vulnerability functions

1. はじめに

(1) 研究の目的

東日本大震災は、かつてない広い範囲で甚大な被害をもたらした。ガソリンなどの燃料をはじめとする災害からの復旧・復興に欠かせない物資の供給が停滞した。佐伯・清野¹⁾は、発災直後から関係官庁などから発信された文献の調査や被災地の製油所へのヒアリングを行うとともに、システムダイナミクスの問題解決手法を適用し、地震後のガソリン供給停滞問題の原因やボトルネックを明らかにした。本論文では、さらに今後発生が予想される南海トラフ巨大地震などの広域災害において、懸念される同種の問題発生を軽減することを目的とし、そのための検討方法を示すとともに、予測に必要な製油所損傷度曲線の検討を行う。

(2) 南海トラフ巨大地震への適用に向けた課題

佐伯・清野¹⁾より、被災地域内のガソリン供給のボトルネックとして、①製油所や油槽所からガソリンスタンドにガソリン等を供給するタンクローリーの不足があったこと、②タンクローリーが1日に運送できる回数は通常時は3回が標準だが、タンクローリーにガソリンを積み込む製油所や油槽所のタンクローリー積場機能が被害を受けると1日に運送できる回数が少なくなること、などが明らかとなった。

以上の点などを踏まえ、東日本大震災の事例について構築したシステムダイナミクス・モデルを、今後発生が

懸念される南海トラフ巨大地震に対しても応用することを考える必要がある。それに先立ち、東日本大震災と南海トラフ巨大地震の場合のガソリン供給への影響を、(a)供給元の観点、(b)供給ルートの観点から、以下のようにまとめた。

南海トラフ巨大地震における西日本地方は、東日本大震災における東北地方に比べて、(a)供給元の観点では、製油所等も多く有利な点が多い。しかし、(b)供給ルートの観点からは、道路の二重化などがなされていないため、道路被害がボトルネックとなる可能性があるなど、懸念される点も残る。

(3) 想定地震に対する被害予測のフローの設定および本論文の対象範囲

想定地震に対するガソリンの供給停滞を予測する際のフローの例を、図1のように考えた。その際にインプットとなる要素として、以下のものがあげられる。

- i) 想定地震に対する地震動強さ、津波浸水深
- ii) 地震動および津波に対する製油所の損傷度曲線
- iii) 当該製油所の精製能力
- iv) 被災地域内在庫量と被災地域外からの融通量
- v) 被災地域内の道路の損傷状況

このうち i) と v) は、想定地震に対する被害予測結果であり、既往研究から推定することを考えている。また iii) は、石油連盟等の資料から設定可能である。

ii) では、東日本大震災における製油所の被害事例から、地震動強さあるいは津波浸水深と、製油所の被害割合の

関係を損傷度曲線として設定する。さらに被害割合から求めた操業停止期間と当該製油所の精製能力を掛け合わせて、当該製油所の操業停止によるガソリン精製量の減少量を求める。なお2011年1月現在、日本全国には、製油所が27カ所あり、その多くが瀬戸内海を中心とする西日本に存在する²⁾。

iv)では、被災地域内で既にあるガソリンの在庫量と被災地域外の製油所からのガソリンの融通量を求め、ii)で求めたガソリン精製量の減少量に加味する。

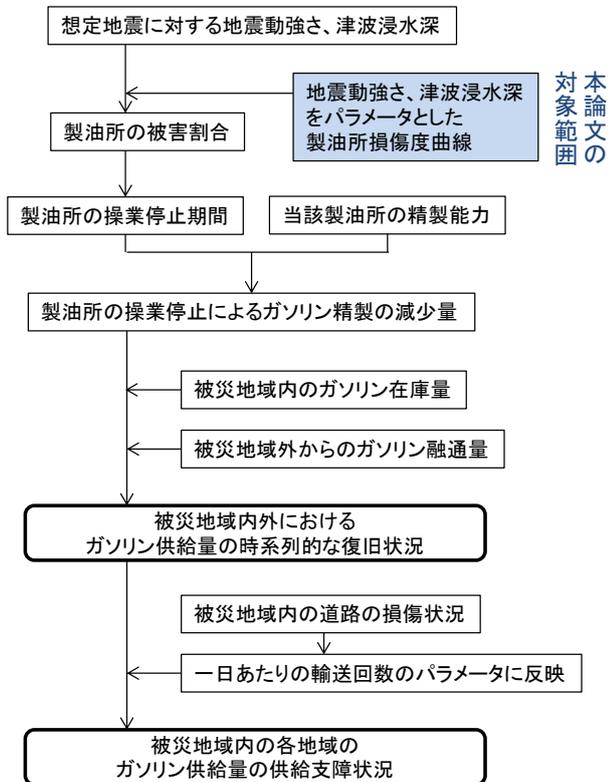


図1 想定地震における被災地域内外のガソリン供給量の復旧状況の予測フロー

以上をもとに、被災地域内外におけるガソリン供給量の時系列的な復旧状況をアウトプットとし、ガソリンの供給停滞を評価するのが、研究の全体像である。

本論文では、地震動強さおよび津波浸水深をパラメータとする製油所を対象とした損傷度曲線を求める部分が対象範囲である。

2. 地震力と津波波力を考慮した損傷度曲線の構築

(1) 基本的なコンセプト

従来の損傷度曲線では、同一建物を対象にしても、地震あるいは津波のいずれかのハザードのみを対象に損傷度曲線が構築されており、それぞれのハザードについて評価が必要になる。この点、地震力あるいは津波波力といった力に注目すれば、同一指標で統一的に評価でき、例えば製油所敷地内のような津波浸水域とそうでない地域の境界付近の被害評価に適しているのではないかと考えたのが、本研究の特徴である。

地震力と津波波力を同一指標で表した損傷度曲線を構築するにあたり、図2のように基本的なコンセプトを考えた。まず、静的な力を仮定して、地震力による加速度と津波波力による加速度をそれぞれ求める。地震力による加速度 α_j については、その地点の地表最大加速度を採用する。津波波力による加速度 α_t については、まず津波の浸水深のほか、建物の幅や高さから津波波力を求める。浸水深のみをパラメータとした損傷度曲線と比べた場合の、この方法のメリットとしては、個々の建物の形状に応じた津波波力の算出が可能ながあげられる。この津波波力を建物質量で除することにより、津波に起因する加速度 α_t が求められる。 α_j と α_t を組み合わせることで求めた換算加速度 α_{jt} をパラメータに損傷度曲線を構築する。

なお建物形状といった必要情報が増えると、広域での評価はしづらくなると考えられるが、本研究で対象としている製油所敷地内のように、図面が用意できる範囲内

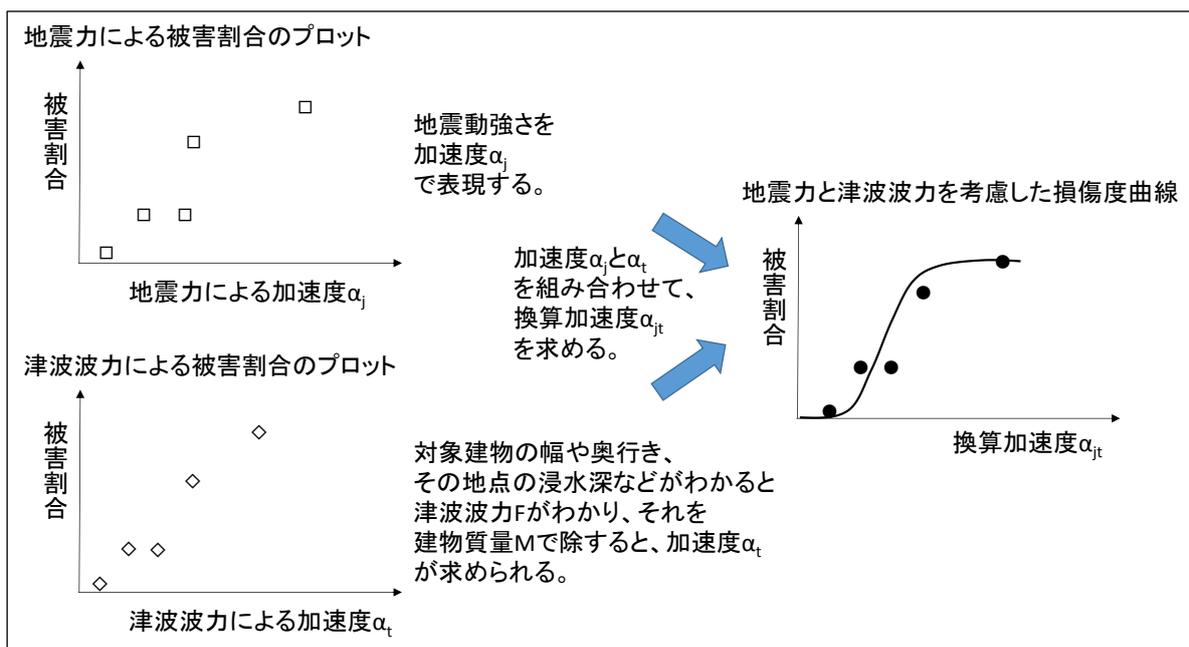


図2 地震力と津波波力を同一指標で表した損傷度曲線の構築の基本的なコンセプト

であれば、全ての建物の幅や高さは把握できるので、予測精度が高くなるメリットのほうが大きいと考えた。またこれからは、建物形状などの情報整備が進むことが考えられるので、将来は広域での予測も可能になるかもしれない。

(2) 使用したデータ

損傷度曲線を構築するにあたり、まず建物被害データが必要となるが、本論文では、東日本大震災で被災した建物の情報として、門馬ほか³⁾のデータベースを用いた。また、津波浸水深のデータとして、国土交通省都市局「復興支援調査アーカイブ」データ⁴⁾を用いた。このデータは、津波の浸水区域、浸水深、建物被災状況を調査したものである。本研究では、津波による浸水区域で、つまり地震動と津波による被害が両方入り混じった区域での評価を試みている。この区域では、多かれ少なかれ津波の被害を受けているが、特に津波の被害が小さかった場合の被害を地震動により説明しようとしている。

これらを宮城県名取市において重ね合わせ表示したものが、図3である。

(3) 地震力および津波波力による加速度の算出

南三陸町10棟、名取市10棟の建物について、地震力および津波波力の算出を行った。地震力による加速度については、門馬ほか³⁾に収録されている計測震度のメッシュ情報から童・山崎⁵⁾を用いて、地表最大加速度を求め、 α_j とした。津波波力による加速度については、内閣

府防災担当による津波避難ビルガイドライン⁶⁾に示されている津波波力の式(式[1]参照)に、門馬ほか³⁾のデータベースから読み取れる建物の幅などのデータを入力することにより求めた。表1に計20棟について、被害状況、パラメータおよび計算値を示している。斜字は計算により求められた値である。なお今回は、製油所の損傷度曲線を求めるのが目的であるので、比較的大規模な建物を選択し、その構造および階数を、非木造の2階建て(高さ8m)、1㎡当たりの自重および積載荷重の合計を3,200kgと仮定した。また水の単位体積質量は、海水として1.030(t/m³)とした。

$$Q_z = \frac{1}{2} \rho g B \{ (6hz_2 - z_2^2) - (6hz_1 - z_1^2) \} \quad [1]$$

ここに、

Q_z : 構造設計用の進行方向の津波波力 (kN)

ρ : 水の単位体積質量 (t/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

B : 当該部分の幅 (流れに直交する方向) (m)

h : 設計用浸水深 (m)

z_1 : 受圧面の最小高さ ($0 \leq z_1 \leq z_2$) (m)

z_2 : 受圧面の最高高さ ($z_1 \leq z_2 \leq 3h$) (m)

これを建物質量で除して、津波波力による加速度 α_t を求めた。

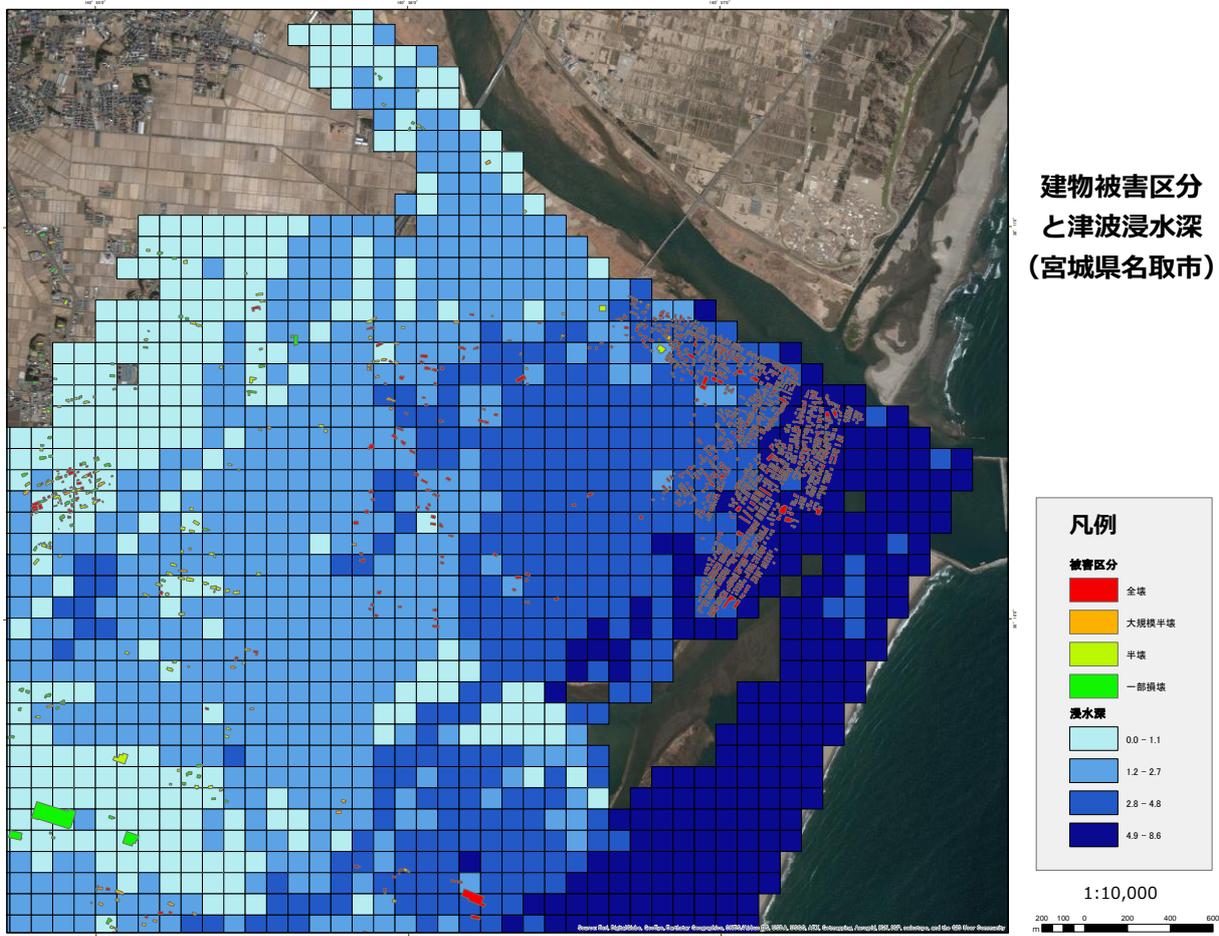


図3 建物被害区分³⁾と津波浸水深⁴⁾(宮城県名取市の例)

表 1 20 棟の建物についての被害状況、パラメータおよび計算値

市町名	建物 ID	被害区分	計測震度	浸水深 h (m)	建物幅 B (m)	建物奥行 (m)	地震力による加速度 α_j (gal)	津波波力 Q_z (kN)	津波波力による加速度 α_t (gal)	換算加速度 α_{jt} (gal)
南三陸町	M01	全壊	5.85	8.1	50	87	607	81,963	589	607
南三陸町	M02	全壊	5.84	15.6	34	17	599	117,510	6,353	6,353
南三陸町	M03	大規模半壊	5.52	3.4	11	16	406	5,507	978	978
南三陸町	M04	半壊	5.52	0	9	16	406	0	0	406
南三陸町	M05	一部損壊	5.52	0	28	12	406	0	0	406
南三陸町	M06	全壊	5.60	3.7	11	23	448	6,307	779	779
南三陸町	M07	半壊	5.60	0	18	11	448	0	0	448
南三陸町	M08	一部損壊	5.60	1.5	16	10	448	1,635	319	448
南三陸町	M09	全壊	5.59	7.3	8	14	442	11,564	3,226	3,226
南三陸町	M10	全壊	5.81	7.4	18	7	578	26,454	6,561	6,561
名取市	N01	全壊	5.81	3.8	44	100	578	26,293	187	578
名取市	N02	大規模半壊	5.90	2.8	11	40	645	3,908	278	645
名取市	N03	半壊	5.88	0.8	46	60	629	1,337	15	629
名取市	N04	一部損壊	5.88	0.2	91	189	629	165	0	629
名取市	N05	一部損壊	5.88	0	60	62	629	0	0	629
名取市	N06	全壊	5.91	3.3	45	16	653	21,440	931	931
名取市	N07	大規模半壊	5.91	1.8	10	15	653	1,472	307	653
名取市	N08	大規模半壊	5.91	2.8	13	6	653	4,619	1,851	1,851
名取市	N09	全壊	5.91	1.6	37	11	653	4,302	330	653
名取市	N10	半壊	5.91	1.6	16	15	653	1,861	242	653

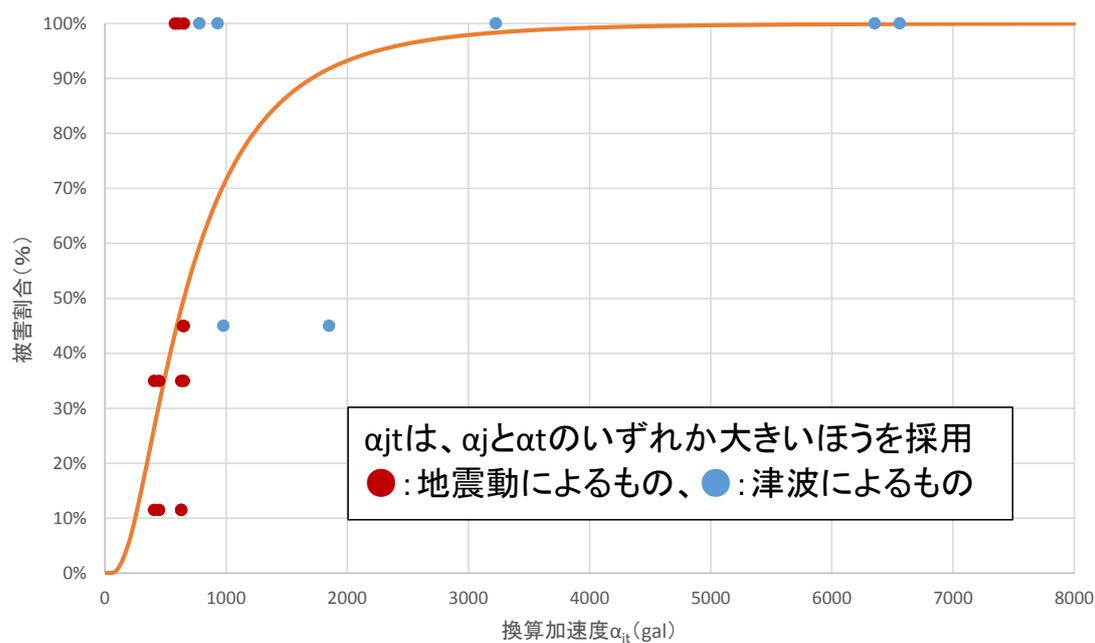


図 4 換算加速度と被害割合の関係および回帰された損傷度曲線

(4) 換算加速度 α_{jt} の算出

換算加速度 α_{jt} は、地震力による加速度 α_j と津波波力による加速度 α_t を組み合わせて求める。組み合わせる方法としては、 α_j と α_t の大きいほうを取る方法を採用した。これは、地震動と津波のどちらか大きいほう一方が、被害を決定するという考えに基づく。

(5) 損傷度曲線の構築

上記の 20 棟に対し、横軸を換算加速度 α_{jt} 、縦軸を建物 1 棟の中の被害割合としてプロットし、最小二乗法により、対数正規分布の累積確率分布関数（式[2]参照）への回帰曲線を求めた。

$$F(x; \lambda, \zeta) = \Phi\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right) \quad [2]$$

ここに、 Φ は標準正規分布の累積確率分布関数である。

結果を図 4 に示す。なお、被害区分を被害割合に換算するにあたり、内閣府の被害認定統一基準⁷⁾から、住家の主要な構成要素の経済的被害を住家全体に占める損害割合で表した場合、全壊は 50% 以上、大規模半壊は 40% 以上 50% 未満、半壊は 20% 以上 50% 未満、地震保険における一部損は、建物の主要構造部の損害の額が、その建物の時価の 3% 以上 20% 未満である⁸⁾ことから、これらを参考に、大規模半壊、半壊、一部損壊は、範囲の平均を考え、それぞれ 45%、35%、11.5% に換算した。全壊については、本研究での被害割合は、被災前後の経済的価値の割合で評価しているが、津波で被災した建物で構造躯体が残っているケースでも、経済的価値は無くなってしまったため、被害割合は 100% とした。

回帰の結果、係数 λ は 6.48、 ζ は 0.751、相関係数は 0.558 となった。

3. 既往の損傷度曲線との比較

(1) 津波を対象とした損傷度曲線との比較

奥野ほか⁹⁾は、東北地方太平洋沖震の津波被害現調査結果に基づく非住家建物（工場、倉庫、事務所建物など）を対象とした津波損傷度曲線を提案している。ここで津波損傷度曲線とは、個々の建物の損傷度合を評価対象としているので、本研究における個々の建物の被害割合を評価対象とした損傷度曲線と比較可能である。ただし、奥野ほか⁹⁾は、浸水深のみをパラメータに津波損傷度曲線を構築しているため、本研究の損傷度曲線と比較する場合、建物の大きさ（幅、奥行き）を仮定して、津波波力を算出する必要がある。今回は、奥野ほか⁹⁾の文献中の図表を参考に、床面積を 400 m² とした RC 造あるいは S 造 2 階建て（高さ 8m）の建物を仮定して、奥野ほか⁹⁾の津波損傷度曲線を求める際に用いた建物データが、(a) 全て幅 20m × 奥行き 20m、(b) 全て幅 40m × 奥行き 10m、(c) 全て幅 10m × 奥行き 40m、と仮定した各場合について、図 5 に RC 造、図 6 に S 造（工場・倉庫）、図 7 に S 造（一般）を、2 章で求めた損傷度曲線と合わせて示した。

図 5 を見ると、建物が全て幅 20m × 奥行き 20m であると仮定した奥野ほか⁹⁾の(a)の津波損傷度曲線に比べ、求めた損傷度曲線は、同じ被害割合のときの換算加速度が大きくなっている。これは、奥野ほか⁹⁾の津波損傷度曲線が、浸水深のみ、すなわち津波波力のみで地震力によ

る被害も説明しており、本論文で考慮している地震力による加速度が評価されていないためと考えられる。また、求めた損傷度曲線は、建物が全て幅 40m × 奥行き 10m であると仮定した(b)、および全て幅 10m × 奥行き 40m であると仮定した(c)の津波損傷度曲線の間に入っており、奥野ほか⁹⁾の津波損傷度曲線と大きく齟齬がないことを確認した。また図 6、図 7 についても、同様の傾向である。

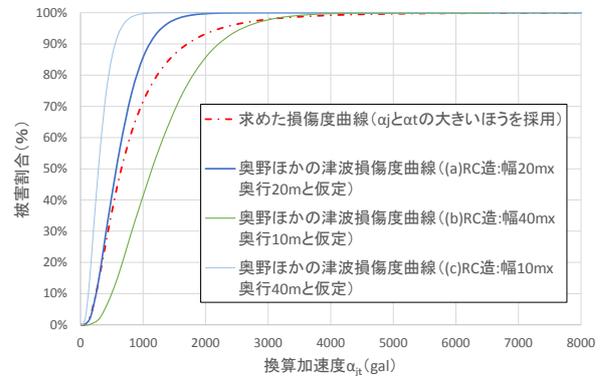


図 5 換算加速度ベースで示した奥野ほか⁹⁾の RC 造の津波損傷度曲線および求めた損傷度曲線

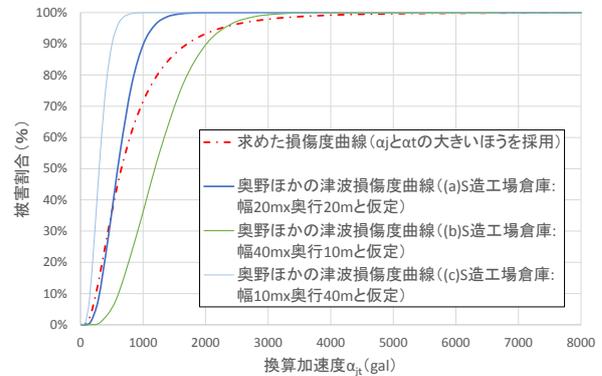


図 6 換算加速度ベースで示した奥野ほか⁹⁾の S 造（工場・倉庫）の津波損傷度曲線および求めた損傷度曲線

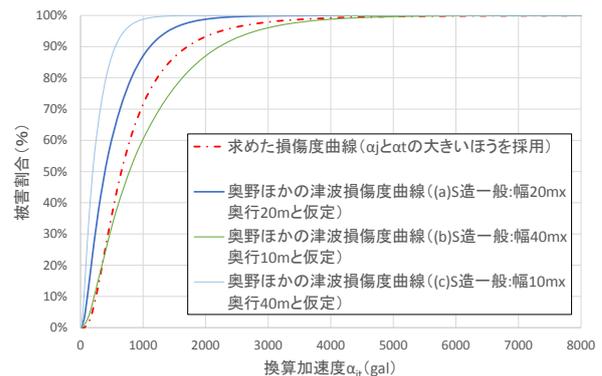


図 7 換算加速度ベースで示した奥野ほか⁹⁾の S 造（一般）の津波損傷度曲線および求めた損傷度曲線

(2) 地震動を対象とした損傷度曲線との比較

高井・岡田¹⁰⁾は、デューデリジェンスのための建物耐震診断結果を利用した損傷度評価関数を、木造建物と RC 造建物について作成している。このうち RC 造建物は、耐震診断値 I_s ごとに作成されていることから、今回求めた損傷度曲線と比較した。なお、高井・岡田¹⁰⁾は、地表

最大速度を地震動指標として作成されているが、これを地表最大加速度にするために、童・山崎⁵⁾を用いて変換した。この結果、図8に示すように、 I_s が0.2の場合と0.3の場合の間に求めた損傷度曲線が入る結果となった。

この理由として、求めた損傷度曲線が地震動と津波を両方とも考慮しているのに対し、高井・岡田¹⁰⁾は、地震動のみを考慮していることがあげられる。今回対象とした20棟の建物は、それほど耐震性に劣る建物とは考えられないが、高井・岡田¹⁰⁾を用いて、仮に津波まで考慮した場合は、 I_s 値が0.2~0.3とかなり耐震性に劣る建物と同等の損傷度曲線となることを示している。

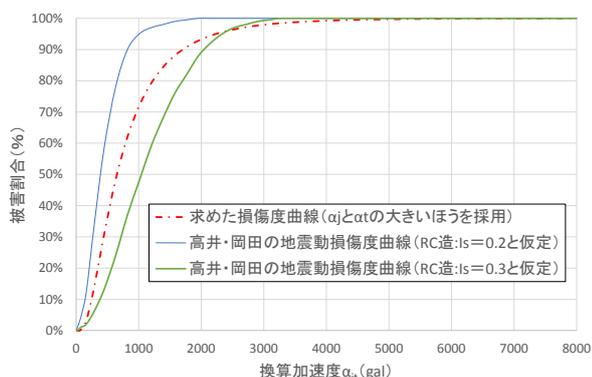


図8 換算加速度ベースで示した高井・岡田¹⁰⁾のRC造の地震動損傷度曲線および求めた損傷度曲線

4. まとめと今後の課題

本論文では、今後発生が予想される南海トラフ巨大地震などの広域災害において、懸念される同種の問題発生を軽減することを目的とし、そのための検討方法をフローチャートで示すとともに、予測に必要な製油所損傷度曲線の検討を行い、既往の研究と比較することにより、その妥当性を検証した。

今後は、今回得られた損傷度曲線を用いて、南海トラフ巨大地震における製油所の被害想定を行うとともに、問題発生の予測およびその軽減策について考える。

謝辞

本研究は、「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の一環として行われたものである。本論文の作成にあたっては、防災科学技術研究所の中村洋光氏、門馬直一氏、長田正樹氏のご協力を得た。記して御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 佐伯琢磨, 清野純史: 東日本大震災におけるガソリン供給問題に関する検討とシステムダイナミクス・モデルの適用, 日本地震工学会論文集, 第14巻第1号, pp.34-43, 2014.
- 2) 石油連盟ホームページ: <http://www.paj.gr.jp/statis/statis/data/08/paj-8精製能力一覧201101up.xls>
- 3) 門馬直一, 藤原広行, 中村洋光, 下村博之, 岡部隆宏, 藤澤誠二: 東北地方太平洋沖地震の建物被害情報データベースの構築, 第14回日本地震工学シンポジウム, pp.931-937, 2014.
- 4) 国土交通省都市局: 「復興支援調査アーカイブ」データ, <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp>
- 5) 童華南, 山崎文雄: 地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係, 生産研究, 第48巻11号, pp.547-550, 1996.
- 6) 内閣府防災担当: 津波避難ビルガイドライン, 巻末資料② (2015年9月1日現在, 下記ページよりダウンロード可能) http://www.2x4assoc.or.jp/builder/news/pdf/jisinchosa_08.pdf
- 7) 内閣府: 被害認定基準運用指針, p.1, <http://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/shishinall.pdf>
- 8) 損害保険料率算出機構: 日本の地震保険, pp.64-65, http://www.giroj.or.jp/disclosure/q_ofjapan/nihonjishin_3.pdf
- 9) 奥野峻也, 登柳正夫, 山口亮, 山本治貴, 越村俊一: 東北地方太平洋沖震の津波被害現調査結果に基づく非住家建物を対象とした津波損傷度曲線, 日本地震工学会論文集, 第14巻第5号, pp.68-81, 2014.
- 10) 高井 伸雄, 岡田 成幸: デューデリジェンスのための建物耐震診断結果を利用した損傷度評価関数(2)木造建物とRC造建物(解析編), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊, pp.27-28, 2002.

(原稿受付 2016.9.10)

(掲載決定 2017.1.21)