

地点別の地盤増幅特性を考慮した貯水槽被害の危険性評価

亀山拓希* 佐藤尚次** 小野泰介*** 平野廣和****

Risk Evaluation of Water Tank Damage Considering Site Specific Ground Amplification Characteristics

by

Hiroki KAMEYAMA*, Naotsugu SATO**, Taisuke ONO*** and Hirokazu HIRANO****

The Kumamoto earthquake in 2016 caused damage to many water tanks. Sloshing caused by slightly longer-period seismic motion and bulging caused by shorter-period seismic motion are possible causes of damage to water tanks due to earthquakes. Since the periodic characteristics of seismic motions are greatly affected by the amplification characteristics of the surface soil, the damage to the water tanks is expected to be greatly affected by the ground characteristics. Therefore, this study evaluated the relationship between water tank damage and ground characteristics, and assessed the risk of damage to water tanks for earthquakes that are expected to occur in the future. The results showed that there is some relationship between water tank damage and ground characteristics, and that analysis of ground characteristics may be used to assess the risk of water tank damage.

Key words: Earthquake risk analysis, Ground characteristics, Bulging phenomenon, Sloshing phenomenon

1 緒 言

我が国では、これまでに多くの大規模地震が発生し、その度に様々な形の被害が数多く報告されている。2016年に発生した熊本地震では、市民の生活に影響する学校、病院、集合住宅等の給水タンクや水道局施設の配水タンクに多くの被害が発生している¹⁾²⁾。さらに、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震においても、東北地方の広範囲で多くの貯水槽被害が発生している³⁾。このような貯水槽被害は、市民の生活に必要な水の供給に支障をきたすため、災害時の生活に大きな影響を与える恐れがある。

地震による貯水槽被害の要因として、やや長周期地震動によって、貯水槽内の水が共振することで液面揺動するスロッシング現象と短周期地震動によって、貯水槽と内容物が連成振動するバルジング現象がある。これらは、地震動の卓越周期とスロッシング、バルジングの固有周期が近接する場合に、より大きな振動が発生し、被害を引き起こす。また、貯水槽被害の発生に影響を与える地震動の周期特性は、表層地盤の増幅特性の影響を大きく受けることが知られている。以上のことから、貯水槽被害の発生は地震動の周期特性と関連があるため、地点別の地盤増幅特性が大きな影響を与えたと考えられる。

地震による貯水槽の被害について、塩野谷ら⁴⁾や遠田ら⁵⁾は実機貯水槽を用いて加振実験を行い、スロッシン

グ、バルジング振動時の挙動、特徴の把握を行っている。また、井上ら¹⁾は熊本地震における貯水槽被害の調査を行うとともに、熊本県周辺の広域地震動観測記録から熊本県内の地震動応答スペクトル分布を求め、貯水槽被害と地震動特性との関係について検討し、貯水槽のスロッシング、バルジングによる被害が地震動の応答スペクトル特性に深く関係していることを明らかにした。このように、実機貯水槽を用いたスロッシング、バルジングの特徴の分析や貯水槽被害と地震動特性の関係に関する研究は行われている。しかし、将来的に、首都圏などで発生すると想定されている大規模地震について、貯水槽被害が発生する危険性について評価している研究は少ない。発生する被害の内容やリスクの大小などの危険性を、より詳細に評価することが可能になれば、制振装置等の導入などの対策の進展にも大きな影響を与えることができると考えられる。

以上のことから本研究では、貯水槽設置個所における地震動の周期特性が、表層地盤の増幅特性の影響を大きく受け、これが発生しうる被害に関係しうることについて注目する。熊本地震の被害調査結果をもとに、実際の貯水槽被害地点の地盤特性を分析し、貯水槽被害と地盤特性の関連を評価する。そして、今後、発生が想定されている地震に対して、地点別の地盤特性を考慮した貯水槽被害の危険性を評価する。

+ 原稿採択 2023年6月20日 Accepted

* 中央大学大学院理工学研究科都市人間環境学専攻（研究当時）〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27

Dept. of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Science and Engineering, Chuo Univ., 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo

**中央大学理工学部都市環境学科 〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27

Dept. of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Science and Engineering, Chuo Univ., 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo

*** (株) エヌ・ワイ・ケイ設計部 〒104-0031 東京都中央区京橋2-6-15 N.Y.K.Co.Ltd.

****中央大学総合政策学部 〒192-0393 東京都八王子市東中野742-1-

Faculty of Policy Studies, Chuo Univ., 742-1 Higashi-nakano, Hachioji, Tokyo

2 対象地点の選定

本研究では、実際の地震による貯水槽被害として、熊本地震における貯水槽被害地点を対象とし、地盤特性と地震動応答スペクトルを分析することで、貯水槽被害と地盤特性との関連について評価する。熊本地震による貯水槽の被害状況については、貯水槽被害に関する論文、報告書^{1),2),6)}を基に整理した。そして、貯水槽被害地点における地盤柱状図のデータ収集を行った。Table Iに地盤柱状図を入手できた貯水槽被害地点を示す。表中のSはスロッシング、Bはバルジング被害がみられたことを示す。また、東京湾北部地震や南海トラフ巨大地震等により、多大な被害が発生すると想定される東京都23区を対象とし、その中でも、災害時に重要な役割を担うことになる各区の災害拠点病院23地点を対象に、貯水槽被害が発生する危険性の評価を行う。対象地点をTable IIに示す。さらに、熊本地震以外の地震について、熊本地震と同様に貯水槽被害の危険性評価を行うことが可能であるかを調べるため、令和4年福島県沖地震における貯水槽被害地点も対象とする。Table IIIに同地震で貯水槽被害が発生した地点のうち地盤柱状図を入手できた箇所を示す。

3 研究方法

3.1 地震危険度解析の概要

本研究では、地震調査委員会より公開されている「確率論的地震動予測地図」の作成に用いられた手法⁷⁾を参考に解析を行う。地震危険度解析の概要を以下に示す。

- 1) 対象地点周辺の地震活動(想定地震)をモデル化し、それぞれの地震について、地震規模の確率、距離の確率、地震の発生確率を評価する。
- 2) 地震の規模と距離が与えられた場合の地震動強さの推定の確率モデルを設定する。通常は、距離減衰式とそのばらつきによってモデル化する。
- 3) モデル化した全ての地震を考慮し、地震動強さがある着目期間内に少なくとも1度ある値を超える確率(ハザードカーブ)を算定する。
- 4) 固有周期ごとに求めたハザードカーブより超過確率の等しいスペクトル値を結ぶことで一様ハザードスペクトルUHSを算定する。

3.2 想定地震の選定

本研究でUHSの算定に用いる想定地震としては、切迫性の高い地震を考え、地震調査研究推進本部より公開されている長期評価⁸⁾を基に設定する。想定地震の諸元をTable IVに示す。

3.3 地震動強さの算出

地表面の地震動強さは、工学的基盤面の地震動(加速度または速度)応答スペクトルに表層地盤の増幅率を乗じることで算出する。本研究における工学的基盤面はS波

Table I Damage to water tanks caused by the Kumamoto earthquake.

target location	location	Cause of Damage
Mainohara Water Distribution Plant	Minami Ward, Kumamoto City	S
Saiseikai Kumamoto Hospital	Minami Ward, Kumamoto City	B
Rakuzen Water Distribution Pond	Otsu Town, Kikuchi District	B
Tsutsujidai Water Distribution Pond	Otsu Town, Kikuchi District	B,S
Fukeda Water Distribution Pond	Otsu Town, Kikuchi District	B
Yomoti Water Distribution Plant	Kosa Town, Kamimashiki District	B
Mashiki Hospital	Mashiki Town, Kamimashiki District	S

B : bulging, S : sloshing

Table II Target locations in Tokyo.

target location	Location
Nippon Medical School Hospital	Bunkyo Ward
Toho University Medical Center Omori Hospital	Ota Ward
Tokyo Metropolitan Hiroo Hospital	Shibuya Ward
Tokyo Medical University Hospital	Shinjuku Ward
Teikyo University Medical School Hospital	Itabashi Ward
Tokyo Women's Medical University East Medical Center	Arakawa Ward
Tokyo Metropolitan Bokutoh Hospital	Sumida Ward
Nihon University Hospital	Chiyoda Ward
Showa University Hospital	Shinagawa Ward
Kanto Central Hospital of the Mutual Aid Association of Public School Teachers	Setagaya Ward
Nitobe Memorial Nakano General Hospital	Nakano Ward
Tokyo Metropolitan Ohtsuka Hospital	Toshima Ward
The Jikei University Katsushika Medical Center	Katsushika Ward
Koto Hospital	Koto Ward
St. Luke's International Hospital	Chuo Ward
Tokyo Saiseikai Central Hospital	Minato Ward
Eiju General Hospital	Taito Ward
National Hospital Organization Tokyo Medical Center	Meguro Ward
Rissho Kosei-kai Affiliated Kosei Hospital	Suginami Ward
Tokyo Kita Medical Center	Kita Ward
Juntendo University Nerima Hospital	Nerima Ward
Nishiarai Hospital	Adachi Ward
Tokyo Rinkai Hospital	Edogawa Ward

Table III Damage to water tanks caused by the Fukushima earthquake. in 2022

target location	location	Cause of Damage
Fujita General Hospital	Date District, Fukushima Prefecture	S
Soma General Hospital	Soma City, Fukushima Prefecture	B
Chuo University Korakuen Campus	Bunkyo Ward, Tokyo	S

B : bulging, S : sloshing

速度 $V_s = 300 \text{ m/s}$ となる地盤とする。工学的基盤面における加速度応答スペクトルの推定は、安中ら⁹⁾によって提案された最短距離を用いた距離減衰式(1)を用いる。

$$\log S_A(T) = C_m(T)M + C_h(T)h - C_d(T) \log d + C_0(T) \\ d = X + 0.334 \exp(0.653M) \quad (1)$$

ここで、 $S_A(T)$ は水平加速度応答スペクトル、 T は固有周期、 M はマグニチュード、 h は震源深さ、 X は震源距離、 C_m 、 C_h 、 C_d 、 C_0 は回帰係数である。

Table IV postulated earthquake.

postulated earthquake	M	Average occurrence interval	Latest activity period	Distribution Shape	Epicenter depth (km)
North Tokyo Bay earthquake	7.3	27.5 years		Poisson	30
Kamogawa Lowland Fault Zone	7.2	7900 years		Poisson	15
Shiozawa Fault Zone	6.8	800 years		Poisson	10
Southern part of Miura Peninsula Fault Group	6.1	1600 years		Poisson	15
Kinugasa-Kitatake Fault Zone, Main part of the Miura Peninsula Fault Group	7	3400 years	1409 years ago	BPT	15
Takeyama Fault Zone, Main part of the Miura Peninsula Fault Group	6.6	1750 years	2105 years ago	BPT	15
Tachikawa Fault Zone	7.4	12500 years	16500 years ago	BPT	18
postulated Tokai earthquake	8	118.8 years	166 years ago	BPT	20
Tonankai earthquake	8.1	86.4 years	76 years ago	BPT	20
Nankai earthquake	8.4	90.1 years	74 years ago	BPT	20

3・4 地盤増幅特性の算出

表層地盤の地盤増幅特性は、工学的基盤面に対する地表面との変位の比である周波数応答関数で表される。対象層を r 、基準層を s としたときの周波数応答関数 $Z_{r/s}(\omega)$ は次式(2)より算出する。本研究では、対象層 r を地表面、基準層 s を工学的基盤面とする。

$$Z_{r/s}(\omega) = \frac{A_r + B_r}{A_s + B_s} \quad (2)$$

ここで、係数 A と B は次の漸化式(3)、(4)より地表面から次々に算出する。

$$A_{i+1} = \frac{1}{2} [(1 + R_i)A_i e^{ip_i H_i} + (1 - R_i)B_i e^{-ip_i H_i}] \quad (3)$$

$$B_{i+1} = \frac{1}{2} [(1 - R_i)A_i e^{ip_i H_i} + (1 + R_i)B_i e^{-ip_i H_i}] \quad (4)$$

ここで、 R_i は相重なった2層間のインピーダンス比、 p_i は各層の伝播定数、 H_i は各層の厚さである。

3・5 一様ハザードスペクトル(UHS)の算出

地震動強さが着目期間内に少なくとも1度ある値を超える確率（ハザードカーブ）を式(5)で算出する。

$$P(Y > y; t) = 1 - \prod_k \{1 - P_k(Y > y; t)\} \quad (5)$$

ここで、 $P_k(y > y; t)$ は k 番目の地震によって t 年間に少なくとも1回地震動強さが y を超える確率である。

UHSは、Fig. 1に示す概念図のように、固有周期毎に求めたハザードカーブより、年超過確率 P の等しいスペクトル値を抽出し、結ぶことで算出する。本研究では、 P の目標値として再現期間50年を設定する。これは貯水槽被害が「しばしば起こりうる地震」に対して警戒すべきものという認識による。

3・6 応答スペクトルの類似度評価

本研究では、熊本地震による貯水槽被害地点と、東京都の対象地点における地震動応答スペクトルの類似度を評価し、類似度が高いと評価された地点の地震動応答スペクトルを抽出することで、貯水槽被害の危険性を評価する。この類似度評価には、久世ら¹⁰⁾によって提案された地震動波形に含まれる工学的特徴を的確に捉えることが可能な特徴ベクトルを定義し、これに基づいた波形の類似度評価手法を用いる。これは、多数の波形群(波

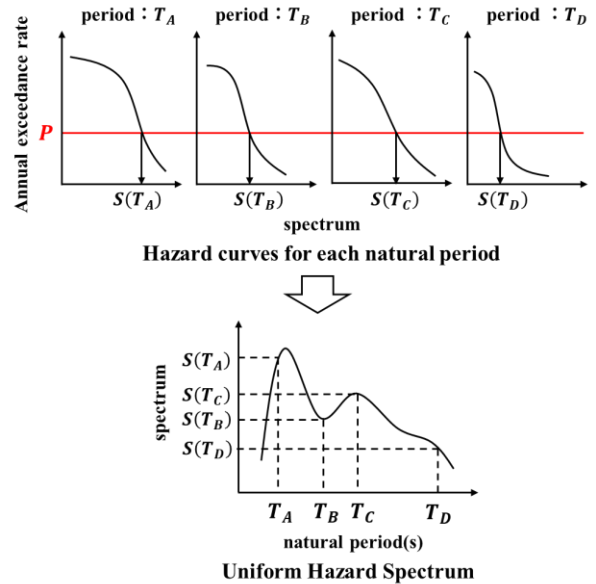


Fig. 1 Conceptual Diagram of Uniform Hazard Spectrum.

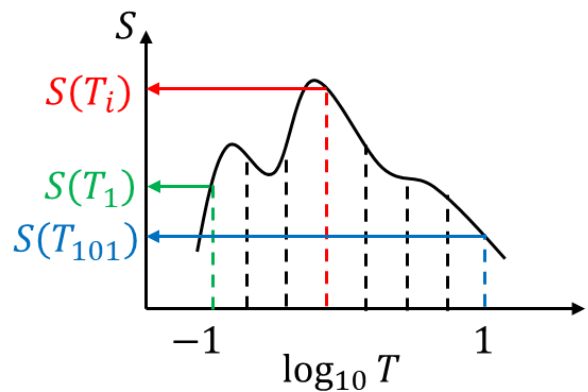


Fig. 2 Conceptual diagram of feature vectors representing periodic characteristics.

形インベントリー) に対して特徴ベクトルを算出し、波形間の類似度評価を行うことで、波形インベントリーより、任意の基準波形に類似した波形を抽出する手法である。以下に久世ら¹⁰⁾の手法の概要を示す。

3・7 振幅・周期特性の特徴量抽出

振幅・周期特性の特徴量抽出は、建物被害率に関する

境ら¹¹⁾や星ら¹²⁾の既往研究を参考にしつつ、液面振動の減衰が大きくないこと、UHSの算出しやすさなどを考慮して、減衰定数5%で算出した、加速度および速度応答スペクトルを用いる。抽出においては、Fig. 2に示すように、線形1自由度系の固有周期 $T=0.1-10s$ の区間を対象に、対数軸上で100等分した $N=101$ 点の周期を用いる。

$$T_i = 0.1 \times 10^{\left(\frac{2}{100}\right)(i-1)} \quad (i = 1, \dots, 101) \quad (6)$$

式(6)における101点の周期 T_i ごとに算出した、減衰定数5%の速度応答スペクトルを $S_V(T_i)$ として、101次元の特徴ベクトル $S_V = \{S_V(T_1), \dots, S_V(T_{101})\}$ とする。

3・8 非類似度の算出

基準波形 a より算出した特徴ベクトルを Sv_a 、任意波形 b より算出した特徴ベクトル Sv_b として、波形間の非類似度 $D_{Sv}(a, b)$ を式(7)より算出する。振幅・周期特性の特徴ベクトル Sv_a 、 Sv_b に関しては、振幅特性を考慮した非類似度を算出する。ユークリッド距離を参考に、後述の重み係数 w_i を導入する。

$$D_{Sv}(a, b) = \sqrt{\sum_{i=1}^{101} (Sv_{ai} - Sv_{bi})^2 w_i^2} \quad (7)$$

w_i は重み係数であり、式(8)に示すように基準特徴ベクトル Sv_a より定義する。

$$w_i = \frac{(Sv_{ai})^k}{\sum_{i=1}^{101} (Sv_{ai})^k} \quad (8)$$

$k=0$ では重みを考慮せず、全周期を等しい重みで距離が算出され、 k が大きな値であるほど、スペクトルのピークを重視した重み係数を与える。

以上のように、振幅・周期特性は式(7)と式(8)を用いて、重み係数 w_i により、基準波形の速度応答スペクトルにおいて応答値が大きな周期帯を重視して非類似度を算出する。

本研究では、以上で示した類似度評価手法を加速度応答スペクトル、速度応答スペクトルに適用する。また、熊本地震による地震動応答スペクトルを基準波形 a とし、東京都の対象地点での想定地震における応答スペクトルを任意波形 b として非類似度の算出を行う。また、重み係数 w_i に含まれる k の値については、大きい値をとるほどスペクトルのピークを部分に類似度が支配されるようになるが、ピークをある程度重視しつつ、他の周期帯の類似度も考慮に入れた評価を行うため、比較の結果、 $k=0.5$ を選択することとして評価する。さらに、本研究における類似度評価では、後述のスロッシング・バルジングの固有周期をカバーする周期 $0.1-4.0s$ の範囲に限定して評価対象とし、東京都の対象地点23地点全てで評価を行い、類似度の高い上位5地点の波形を抽出する。

4 解析結果

4・1 熊本地震における解析結果

熊本地震における貯水槽被害地点での表層地盤の増

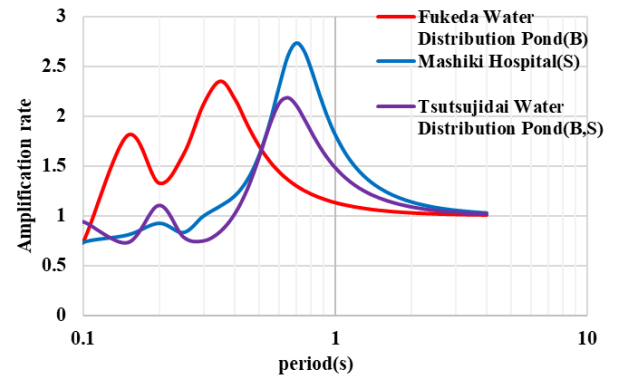


Fig. 3 Ground Amplification in Kumamoto Earthquake.

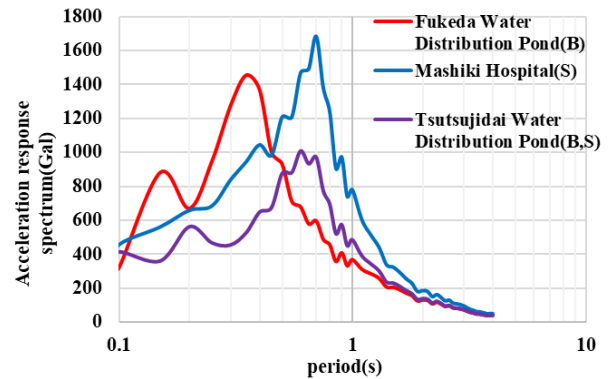


Fig. 4 Acceleration Response Spectrum in Kumamoto Earthquake.

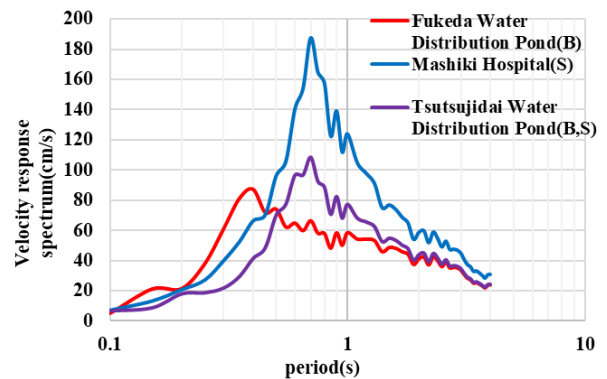


Fig. 5 Velocity Response Spectrum in Kumamoto Earthquake.

幅特性の算出結果のうち、それぞれの被害原因についての算出結果の一部をFig. 3に示す。また、熊本地震での加速度応答スペクトルの算出結果の一部をFig. 4に、速度応答スペクトルの算出結果の一部をFig. 5に示す。

まず、バルジング被害が発生した吹田配水池では、Fig.3をみると、地盤増幅率のピークは0.35s程度となっている。これは、箕輪¹³⁾の研究結果を基に定めた一般的なバルジングの固有周期である $0.15-0.4s$ と一致しており、バルジング被害との対応性が良いと考えられる。次に、Fig. 4の吹田配水池の加速度応答スペクトルをみると、地盤増幅率のピークと同程度の0.35s付近で卓越し、1400Galを超える大きな加速度応答を示している。また、前述の一般的なバルジングの固有周期とも一致していることから、バルジングの危険性が高かった地点といえる。

スロッシング被害が発生した益城病院では、Fig. 3 をみると、地盤増幅率のピークが 0.7s 程度となっている。これは、井上ら¹⁾の調査結果を基に定めた一般的なスロッシングの固有周期である 1.6-3.8s と比べ、短周期となっているが、他の被害地点と比較すると長周期側で卓越していることが分かる。次に、Fig. 5 の益城病院の速度応答スペクトルをみると、地盤増幅率のピーク付近で卓越し、180cm/s を超える大きな速度応答を示している。こちらも前述の一般的なスロッシングの固有周期と比べ、短周期ではあるが、周期 1.0s より長周期側でも 100cm/s を超える大きな速度応答を示している。

次に、バルジング・スロッシングの両方が被害原因であるつつじ台配水池では、Fig. 3 をみると、地盤増幅率のピークは 0.65s であり、益城病院と吹田配水池の地盤増幅率のピークの間となっている。しかし、他の地点や Fig. 4 の加速度応答スペクトルと Fig. 5 の速度応答スペクトルをみると、それぞれの卓越周期は他の被害地点における卓越周期の間となっはいるが、明確な違いはなく、バルジング・スロッシングどちらも発生する危険性が高い地点であったと考えられる。

以上のように、地震による貯水槽被害と表層地盤の増幅特性、応答スペクトルには、ある程度の関連があると考えられる。

4.2 類似度評価の結果

バルジング被害が発生した吹田配水池の加速度応答スペクトルを基準として、類似度評価を行い、類似度の高い上位 5 地点の波形を抽出した結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 をみると、吹田配水池での加速度応答スペクトルと類似度が高いと評価され、抽出された 5 地点は、加速度応答スペクトルの卓越周期が 0.3-0.4s 程度で 1000Gal を超える大きな加速度応答を示している。これらは、吹田配水池の加速度応答スペクトルと類似した特徴であり、前述の一般的なバルジングの固有周期である 0.15-0.4s とも近いことから、バルジングが発生する危険性は高いと考えられる。

次に、スロッシング被害が発生した益城病院の速度応答スペクトルを基準波形として、類似度評価を行い、類似度が高い上位 5 地点の波形を抽出した結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 をみると、益城病院での速度応答スペクトルと類似度が高いと評価され、抽出された 5 地点は、速度応答スペクトルの卓越周期は 0.7-1.0s 程度となっており、益城病院での速度応答スペクトルと同様に、前述の一般的なスロッシングの固有周期である 1.6-3.8s と比べ、短周期ではあるが、他の被害地点よりも、長周期側で大きな速度応答を示している。また、類似度が高い上位 3 地点は、100cm/s を超える大きな速度応答を示している。下位 2 地点についても、速度応答は 80cm/s を超える比較的大きな値を示していることから、これらの 5 地点はスロッシングが発生する危険性は十分に高いと考えられる。

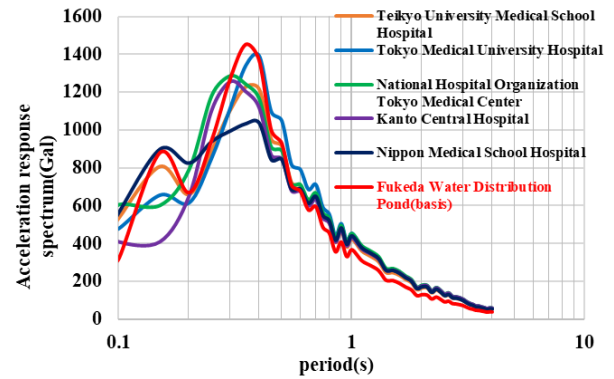


Fig. 6 Results of Similarity Evaluation of Acceleration Response Spectrum at Fukeda Water Distribution Pond.

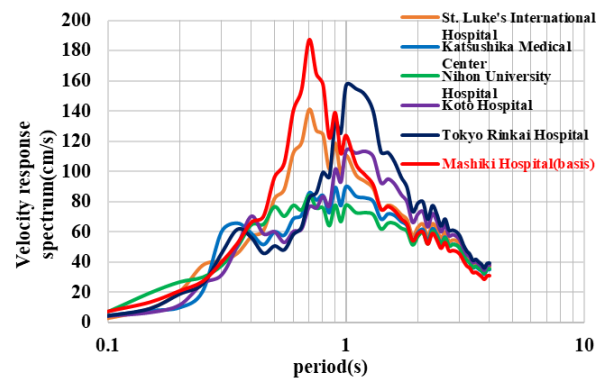


Fig. 7 Results of Similarity Evaluation of Velocity Response Spectrum at Mashiki Hospital.

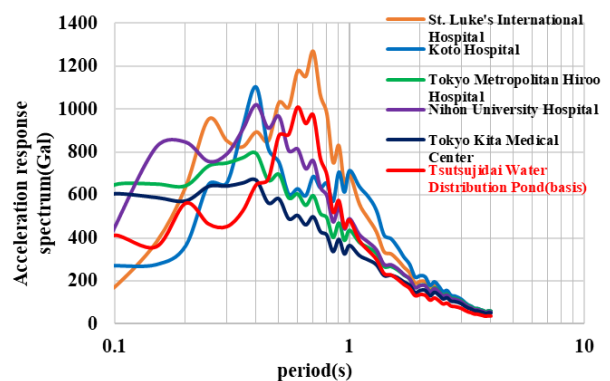


Fig. 8 Results of Similarity Evaluation of Acceleration Response Spectrum at Tsutsujidai Water Distribution Pond.

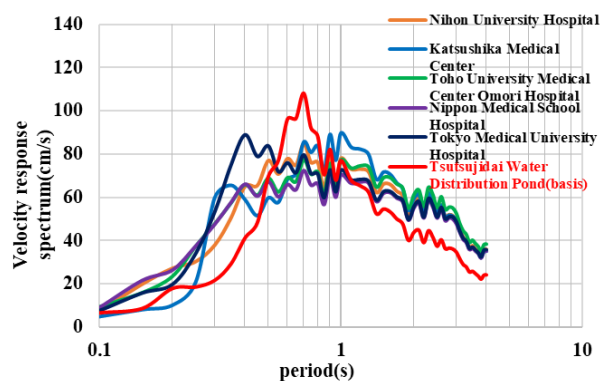


Fig. 9 Results of Similarity Evaluation of Velocity Response Spectrum at Tsutsujidai Water Distribution Pond.

バルジング・スロッシングの両方の被害が発生したつつじ台配水池での加速度応答スペクトルを基準波形として、類似度評価を行い、類似度が高い上位5地点の波形を抽出した結果を Fig. 8 に、速度応答スペクトルを基準として、類似度評価を行い、類似度が高い上位5地点の波形を抽出した結果を Fig. 9 に示す。Fig. 8 をみると、つつじ台配水池での加速度応答スペクトルと類似度が高いと評価され、抽出された5地点は、加速度応答スペクトルの卓越周期は 0.4-0.7s となっており、つつじ台配水池での加速度応答スペクトルと同様に、バルジング、スロッシングの固有周期の中間となっている。また、Fig. 9 をみると、つつじ台配水池での速度応答スペクトルと類似度が高いと評価され、抽出された5地点は、速度応答スペクトルの卓越周期は 0.4-1.0s となっており、Fig. 8 の加速度応答スペクトルと比べ、少しばらつきが大きくなっているが、バルジング、スロッシングの一般的な固有周期と比較した場合には、それぞれの固有周期の中間となっている。

つつじ台配水池のように、バルジング、スロッシングの両方が発生したと考えられる地点では、加速度応答スペクトルと速度応答スペクトルの両方を考慮する必要がある。そこで、前述の加速度応答スペクトルと速度応答スペクトルの類似度評価の結果をみると、両方で類似度が高いと評価されている地点は、日本大学病院のみであった。そのため、この地点ではバルジング、スロッシングの両方が発生する危険性がより高い地点であるといえる。

4.3 貯水槽被害の危険性評価結果

以上で示してきた加速度応答スペクトルと速度応答スペクトルの類似度評価の結果を基に、東京都の対象地点における貯水槽被害の危険性について、被害原因ごとに評価し、東京都 23 区の地図上に結果を示したものを Fig. 10 に示す。この結果から、西側にはバルジング、東側ではスロッシングが発生する危険性が高い地点が多くなっているという傾向が見られる。これは、東京都の地盤の特徴としてよく知られている、東側に軟弱地盤が広がっているという特徴がよく反映されている結果であると考えられる。

ここまでに行ってきた加速度応答スペクトルと速度応答スペクトルの類似度評価と貯水槽被害の危険性評価では、実際には被害の危険性が低い地点でも危険性が高い偽陽性と判定される地点が多くなってしまったという課題があった。そこで、熊本地震で無被害であった学校や病院等を対象に、同様の解析手法を用いて、地盤増幅率・加速度応答スペクトル・速度応答スペクトルについて解析を行い、被害のあった地点と被害の無かった地点の結果を比較することで、偽陽性を減らすことができる評価指標の検討を行った。その結果、地盤増幅率は被害のあった地点と比較して大きな違いは見られなかったが、加速度応答スペクトルと速度応答スペクトルにつ

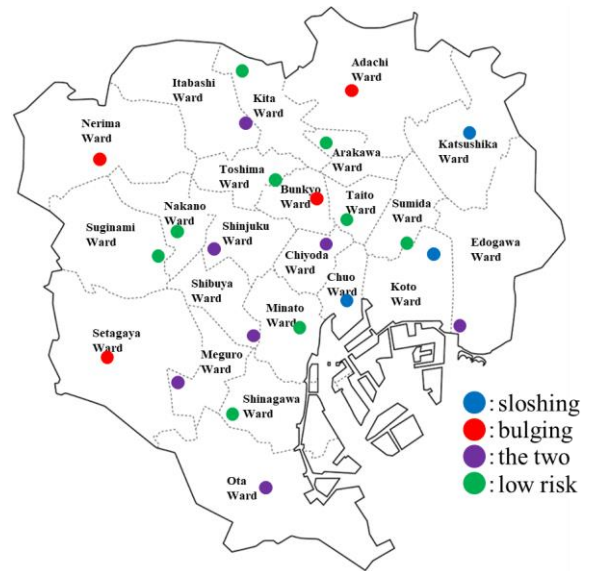


Fig. 10 Result of Hazard Assessment of Water Tank Damage.

いては、被害があった地点と比較して、被害の無かった地点は全体的に小さな応答を示した。具体的には、加速度応答スペクトルは前述の一般的なバルジングの固有

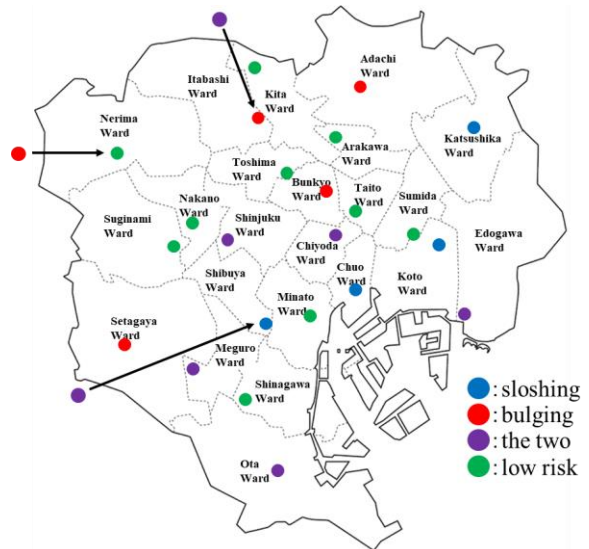


Fig. 11 Results of Hazard Assessment of Water Tank Damage Considering New Assessment Indicators.

周期である 0.15-0.4s における加速度応答が無被害の地点では 1000Gal を下回る地点が多く、速度応答スペクトルは前述の一般的なスロッシングの固有周期である 1.6-3.8s における速度応答が無被害地点では 60cm/s を下回る地点が多いことが分かった。この結果より、偽陽性を減らすことができる新たな評価指標として、前述の一般的なバルジングの固有周期 0.15-0.4s の範囲における最大加速度応答 1000Gal と一般的なスロッシングの固有周期 1.6-3.8s の範囲における最大速度応答 60cm/s を超える地点を貯水槽被害の危険性が高い地点と判定することとした。

次に、以上で検討した結果を踏まえ、この下限値を考慮したうえで、東京都の対象地点における貯水槽被害の

危険性について、評価した結果を Fig. 11 に示す。新たな評価指標を考慮することで、図に示した3地点で評価に変化があったが、全体の傾向である西側にバルジング、東側にスロッシングの危険性が高い地点が多くなっているという傾向には変化がなかった。

4.4 令和4年福島県沖地震における解析結果

熊本地震以外の地震について、同様に貯水槽被害の危険性評価を行うことが可能であるかを調べるため、令和4年福島県沖地震における貯水槽被害地点を対象に解析を行った。解析結果として、貯水槽被害のあった地点における地盤増幅率の評価結果を Fig. 12 に、加速度応答スペクトルと速度応答スペクトルの解析結果をそれぞれ Fig. 13 と Fig. 14 に示す。

Fig. 12 より、バルジング被害が発生した公立相馬総合病院では、地盤増幅率のピークは0.2s程度であり、熊本地震における吹田配水池と同様に、一般的なバルジングの固有周期である0.15-0.4sと一致しており、バルジング被害とよい対応性を示している。一方で、Fig. 13の加速度応答スペクトルとみると、ピークは0.25s程度であるものの、加速度応答は350Gal以下であり、熊本地震と比べると、小さい値となっている。

次に、スロッシング被害が発生した公立藤田総合病院では、Fig. 12より、地盤増幅率のピークは0.25s程度であり、熊本地震の例では、バルジング被害と同様の傾向を示している。しかし、Fig. 14の速度応答スペクトルをみると、卓越周期は1.0s程度であり、スロッシングの特徴となっている。ただ、公立藤田総合病院はバルジングが発生してもおかしくなかった地点だといえる。また、公立相馬総合病院と同様に、速度応答は熊本地震と比べ、とても小さい値を示している。

中央大学後楽園キャンパスは、震源から遠く離れているにもかかわらず、スロッシング被害が発生した。これは、長周期地震動が短周期の波に比べ、減衰しにくく、遠くまで伝わりやすいという特徴の影響によるものと考えられ、震源から遠く離れた地点でもスロッシングは発生することがあるという一例となっている。また、Fig. 12より、地盤増幅率のピークは他の地点より長周期側となっており、熊本地震と比較しても、スロッシングの特徴が出ているといえる。また、前述2地点と同様に、Fig. 14をみると、速度応答は小さな値を示している。

以上の結果から、3地点全てで加速度応答と速度応答が熊本地震と比べ、小さい値を示していることから、熊本地震と同様の基準では評価することができないことが分かる。これは、令和4年福島県沖地震が熊本地震に比べ、震源が深く、震源距離が長くなったことで、距離減衰の影響を大きく受けたためと考えられる。また、熊本地震と同様に、令和4年福島県沖地震で無被害であった地点についても同様の解析を行ったが、被害のあった地点との明確な違いは見られなかった。この結果より、令和4年福島県沖地震では、本研究では考慮できていな

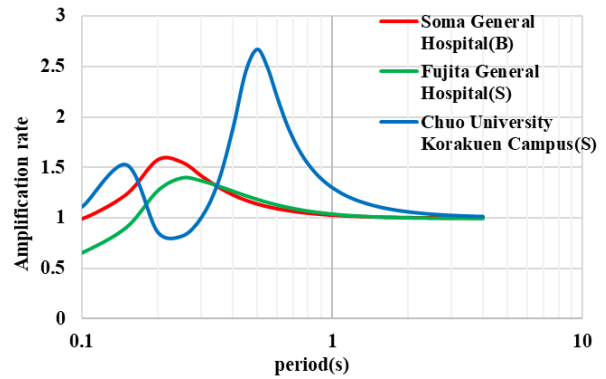


Fig. 12 Ground Amplification in Fukushima Earthquake in 2022.

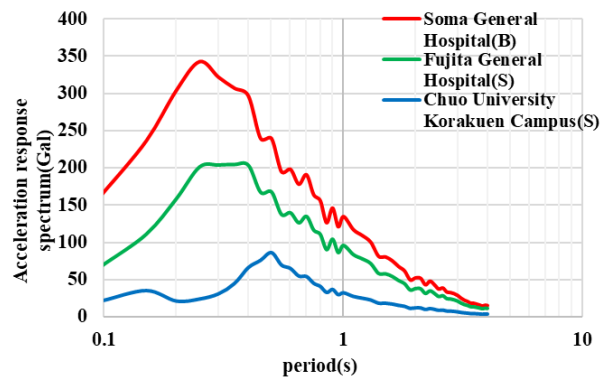


Fig. 13 Acceleration Response Spectrum in Fukushima Earthquake in 2022.

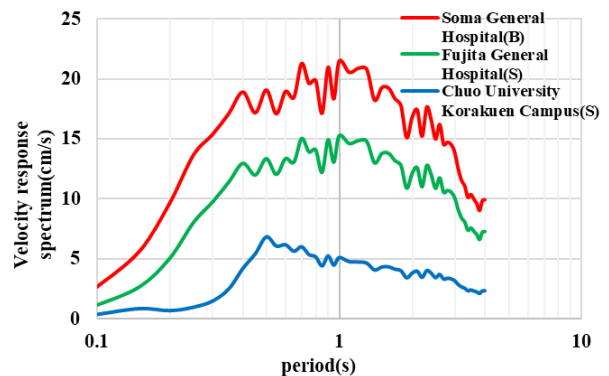


Fig. 14 Velocity Response Spectrum in Fukushima Earthquake in 2022.

い詳細な震源特性や伝播経路特性などの影響を大きく受けていると考えられる。

4.5 解析結果のまとめ

ここまでの結果より、それぞれの地震被害地点の地盤増幅率をみると、バルジング被害地点では、一般的なバルジングの固有周期である0.15-0.4sの範囲内の短周期側で卓越しており、スロッシング被害地点では、バルジング被害地点よりも長周期側で卓越するという傾向が見られた。このことから、バルジングとスロッシングの危険性と地盤特性には、ある程度の関連があると考えられる。特に、バルジング被害が発生した地点の地盤増幅率については、ほとんどの地点で周期0.15-0.4sで卓越しており、一般的に地盤条件が良く、地震危険度が低いと

される地域であっても、バルジングについては生起する危険性があることは否定できないと考えられる。一方で、バルジングが先行しそうな地点でもスロッシングが発生している事例も確認できており、バルジング、スロッシングのどちらが起こってもおかしくない地点は他にも多くあると考えられる。

5 おわりに

本研究では、熊本地震による貯水槽被害地点における地盤特性の解析、応答スペクトルの算出を行い、地震による貯水槽被害と地盤特性の関連について評価を行うとともに、東京都23区の災害拠点病院23地点を対象に、地盤増幅特性、等確率スペクトルの解析を行い、その結果を熊本地震における解析結果を基準として類似度評価を行うことで、貯水槽被害の危険性評価を行った。また、熊本地震以外の地震として、令和4年福島県沖地震を対象に、熊本地震と同様の解析を行い、比較することで、熊本地震では明らかにできなかった影響等の検討、評価を行った。以下に示す結果より、本研究では、地震による貯水槽被害と地盤特性の間には、ある程度の関連があると考えられ、地盤特性の分析を行うことによって、貯水槽被害の危険性を評価できる可能性があるということが分かった。以下に得られた知見をまとめる。

(1) 熊本地震における評価結果としては、バルジング被害が発生した地点では、地盤増幅率のピークが一般的なバルジングの固有周期である0.15-0.4sと近く、バルジング被害と良い対応性を示していることが分かった。また、スロッシング被害が発生した地点では、地盤増幅率のピークは、バルジング被害地点より長周期側で卓越しており、速度応答も同程度の周期で卓越していることが分かった。

(2) 東京都における類似度評価の結果は、いずれの地点においても、よい類似性を示している地点の抽出ができていたことが分かった。また、貯水槽被害の危険性評価の結果として、東京都23区の西側ではバルジング、東側ではスロッシングの危険性が高くなっている地点が多く、東京都の地盤の特徴である東側に軟弱地盤が広がっているという特徴をよく反映した結果となった。

(3) 令和4年福島県沖地震における評価結果では、熊本地震の例では、バルジングの特徴を示している地点でスロッシングが発生している例や震源から遠く離れた地点においてスロッシングが発生している例などが確認できた。これらは、熊本地震では見られなかった特徴であり、本研究では考慮できていない詳細な震源特性や伝播経路特性などの影響によるものであると考えられる。

(4) 現段階の研究手法では、バルジング・スロッシングのどちらが発生してもおかしくない地点が多くあると考えられ、この原因として、本研究では考慮できてい

ない地盤増幅特性以外の詳細な震源特性や伝播経路特性などの影響が考えられる。そのため、今後の課題として、詳細な震源特性や伝播経路特性などによる影響について検討、評価を行い、貯水槽被害発生の有無や詳細な貯水槽被害の危険性評価を行うことができる指標の検討を行うことである。

参考文献

- 1) 井上涼介, 坂井藤一, 大峯秀一: 2016年熊本地震における水槽被害および地震動特性との関連について, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4, I_711-I_720, 2017.
- 2) 厚生労働省: 平成28年(2016年)熊本地震水道施設被害等現地調査団報告書, 2016.
- 3) 井上涼介, 坂井藤一, 大峯秀一: 2011年東北地方太平洋沖地震における水槽の広域被害および地震動特性との関連の分析, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4, I_746-I_773, 2015.
- 4) 塩野谷遼, 平野廣和, 井田剛史, 河田彰: 実機貯水槽を用いたバルジング振動に関する振動実験, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4, I_404-I_411, 2017.
- 5) 遠田豊, 平野廣和, 井田剛史, 佐藤尚次: 実機正方形ステンレス製パネルタンクのスロッシング挙動の把握, 理論応用力学講演会講演論文集, Vol.62, GS01-08, 2013.
- 6) 小野泰介, 遠田豊, 竹本純平, 平野廣和: 熊本地震におけるステンレスパネルタンクの被害状況とスロッシング発生時の損傷の検証, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.137-146, 2020.
- 7) 防災科学技術研究所: 「全国地震動予測地図」作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, No.336, 2009.
- 8) 地震調査研究推進本部: 活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧, 2020.
- 9) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁87型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, Vol.24, 161-164, 1997.
- 10) 久世益充, 能島暢呂: 地震動特性の特徴ベクトルを用いた類似波形の抽出手法, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.75, No.4, I_529-I_540, 2019.
- 11) 境有紀, 瀧澤一起, 神野達夫: 建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第555号, pp.85-91, 2002.
- 12) 星幸江, 丸山喜久, 山崎文雄: 数値解析に基づく地震動SI値と木造建物被害の関係の分析, 土木学会論文集A1, Vol.65, No.1, pp.606-613, 2009.
- 13) 箕輪親宏: スロッシングインパクトを考慮した長方形水槽の耐震性に関する研究, 東京工業大学学位請求論文, 2004.
- 14) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 15) 東京都土木技術支援・人材育成センター: 東京の地盤 (GIS版), 2020.