

# 研 究 報 告

令和 8 年 4 月 21 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 福井工業大学 工学部 建築土木工学科

氏 名 : 西川 隼人

研究課題名 : 貯水タンク被害に影響を及ぼす地震動特性の解明と被害評価への適用

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 31 日

## 貯水タンク被害に影響を及ぼす

### 地震動特性の解明と被害評価への適用

Investigation of earthquake motion characteristics affecting  
water tank damage and application to damage assessment

福井工業大学 教授 西川隼人

#### （研究計画ないし研究手法の概略）

本研究では、貯水タンク被害が多数発生した 2024 年能登半島地震、2016 年熊本地震、2011 年東北地方太平洋沖地震を対象として、貯水タンク被害を引き起こした地震動の特性を解明するために、気象庁、防災科学技術研究所の地震観測点、自治体の震度観測点で記録された地震波形を収集した。解析対象観測点の地震波形を用いて、貯水タンクの設計用地震動として広く用いられている加速度応答スペクトルと擬似速度応答スペクトルを求め、断層最短距離と応答スペクトルの関係を調べることで、地震動の距離減衰特性を考察した。また、地震観測記録から求めた応答スペクトルと設計用地震動の振幅レベルを比較した。

続いて、上記の 3 つの地震などを対象として、貯水タンク設置地点の地震動レベル推定のために、回帰分析によって加速度応答スペクトルと擬似速度応答スペクトルの距離減衰式を求めた。距離減衰式には震源特性に関する項、幾何減衰と内部減衰による伝播経路特性に関する項、および、平均 S 波速度をパラメータとするサイト特性の項から構成されるモデル式を用い、また、震源近傍の地震動の頭打ちを考慮した。平均 S 波速度として、短周期成分に影響する表層 30m の平均 S 波速度と長周期地震動に影響する深部地盤構造から計算した平均 S 波速度を用いた。

解析対象地震のうち、2024 年能登半島地震については、得られた距離減衰式を用いて、既往研究や報告において、貯水タンクの寸法や設置環境、被害状況が詳しく記載されている配水池などの地震動を推定し、地震動強さと貯水タンクの被害状況との対応を考察した。

最後に、2024 年能登半島地震を対象として、距離減衰式から求めた加速度応答スペクトルと擬似速度応答スペクトルに基づき、貯水タンクの側壁に生じるバルジングとスロッシングの動水圧を評価した。動水圧の評価においては、サイト特性や貯水タンクのサイズに着目して、これらの違いによる動水圧の変化を考察した。

#### （実験調査によって得られた新しい知見）

図 1 に本研究で解析対象とした 3 つの地震の震央と地震観測点の分布を示す。2024 年能登半島地震と 2016 年熊本地震については、震源断層の地表面への投影図も示している。2024 年能登半島地震では 52 地点、2016 年熊本地震では 197 地点、2011 年東北地方太平洋沖地震では 426 地点を解析対象とした。

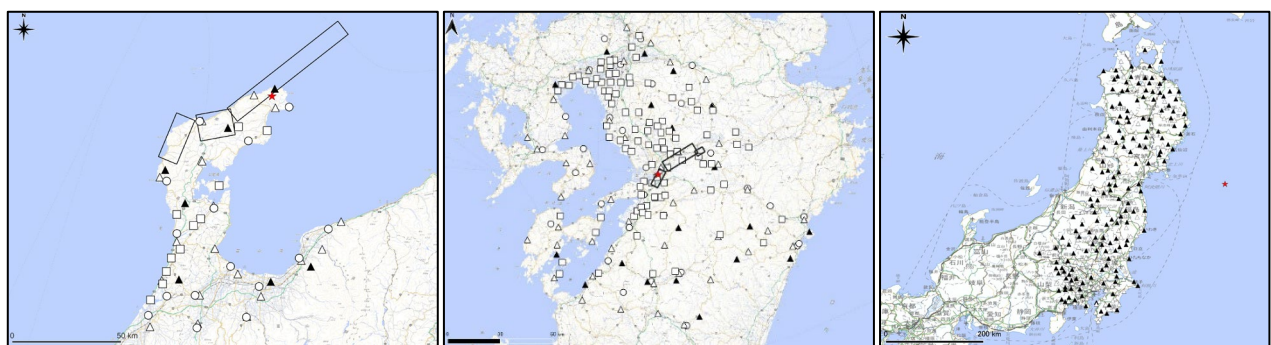
図 1 で解析対象とした 3 地震の地震観測点で得られた地震観測記録について、貯水タンクの設計用地震動として広く用いられている加速度応答スペクトルと擬似速度応答スペクトルの地震動特性を把握するために、解析対象地震の断層最短距離と応答スペクトルの関係を調べた（図 2、図 3）。なお、加速度応答スペクトルはバルジング、擬似速度応答スペクトル

はスロッシングの設計用地震動に対応する．図 2 の加速度応答スペクトルにおいては，既往研究<sup>1)・2)</sup>で示されているバルジング固有周期の範囲を参考に，固有周期 0.1 秒，0.3 秒，0.5 秒に着目した．また，図 3 の擬似速度応答スペクトルは，既往研究のスロッシング固有周期<sup>1)・2)</sup>を参考に固有周期 1 秒，3 秒，5 秒に着目した．図 2 に示す破線は，設計水平震度=1.0 に対応する重力加速度，図 3 の破線は擬似速度応答スペクトルの設計値<sup>3)</sup>である．

図 2 を見ると，2024 年能登半島地震と 2016 年熊本地震では，断層最短距離が 44km 以内で設計値を超える加速度応答スペクトルが見られる．一方，2011 年東北地方太平洋沖地震では断層最短距離が 143km 程度の地点でも設計値を上回る加速度応答スペクトルがあり，他の 2 地震に比べて，短周期地震動が強く励起されたものと考ええる．

図 3 を見ると，2024 年能登半島地震と 2016 年熊本地震は断層最短距離が 70km，2011 年東北地方太平洋沖地震では断層最短距離が 190km 程度まで擬似速度応答スペクトルが設計値を上回るデータがあり，深部地盤構造や伝播経路での長周期地震動の増幅特性が擬似速度応答スペクトルに影響を及ぼしたものと思われる．

次に，貯水タンク設置地点の応答スペクトルを推定するために，図 1 に示す地震観測点の地震波形から求めた固有周期 0.1～10 秒の応答スペクトルを対象に，距離減衰式を求めた．

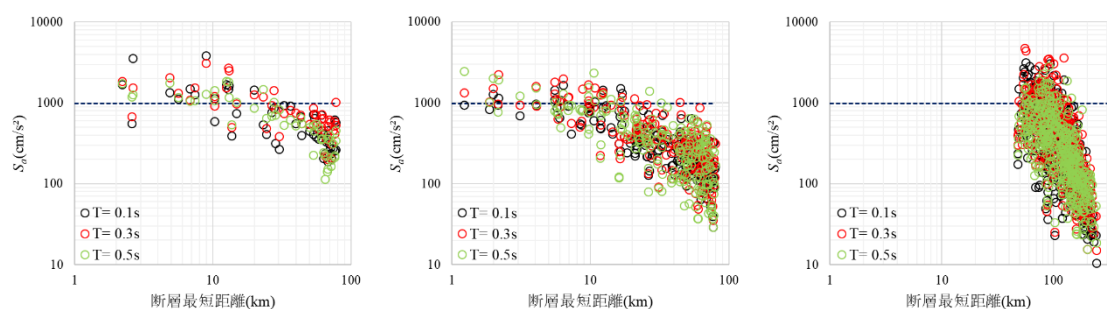


(a)2024 年能登半島地震

(b)2016 年熊本地震

(c)東北地方太平洋沖地震

図 1 地震の震央と地震観測点分布（○：気象庁，△：K-NET，▲：KiK-net，□：自治体，★：震央）

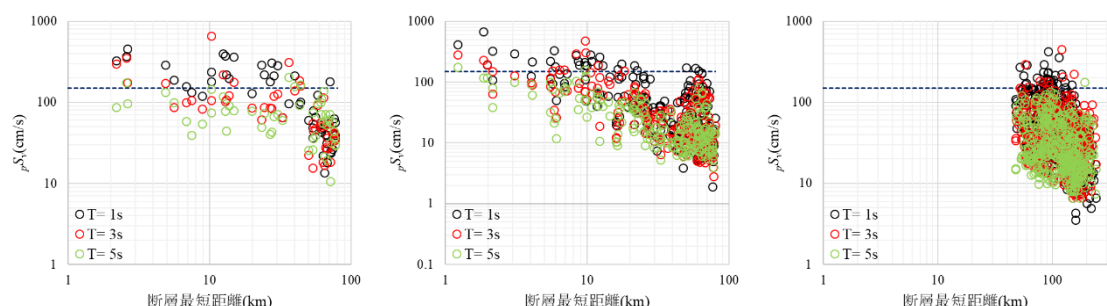


(a)2024 年能登半島地震

(b)2016 年熊本地震

(c)東北地方太平洋沖地震

図 2 断層最短距離と加速度応答スペクトルの関係



断層最短距離(km)

断層最短距離(km)

断層最短距離(km)

(a)2024 年能登半島地震

(b)2016 年熊本地震

(c)東北地方太平洋沖地震

図 3 断層最短距離と擬似速度応答スペクトルの関係

距離減衰式においては、バルジングに関する短周期地震動とスロッシングに関する長周期地震動を考慮するために、表層 30m の平均 S 波速度だけでなく、地震ハザードステーション 4) で公開されている深部地盤構造モデルから求めた平均 S 波速度を用いた。

以下に 2024 年能登半島地震と 2016 年熊本地震を対象に用いた距離減衰式モデルを示す。

$$\log_{10} S_a(T) = c_1(T) - \log_{10}(X + s(T)) + c_2(T)X + c_3(T)\log_{10} V_{S30} + c_4(T)\log_{10} \bar{V}_z(T) \quad (1)$$

$$\log_{10} pS_v(T) = c_1(T) - \log_{10}(X + s(T)) + c_2(T)X + c_3(T)\log_{10} V_{S30} + c_4(T)\log_{10} \bar{V}_z(T) \quad (2)$$

$S_a(T)$  は固有周期  $T$  の減衰定数 5% の加速度応答スペクトル ( $\text{cm/s}^2$ )、 $pS_v(T)$  は固有周期  $T$  の減衰定数 0.5% の擬似速度応答スペクトル ( $\text{cm/s}$ ) であり、水平 2 成分の幾何平均を用いた。計算対象区間は波形全体である。  $X$  は断層最短距離 (km)、 $V_{S30}$  は表層 30m の平均 S 波速度 (m/s)、 $\bar{V}_z(T)$  は深部地盤構造から計算した固有周期  $T$  に対する平均 S 波速度 (m/s) である。 $c_1(T)$  と  $c_2(T)$  はそれぞれ震源特性と内部減衰に対応する回帰係数、 $c_3(T)$ 、 $c_4(T)$  はサイト特性に関する回帰係数、 $s(T)$  は震源近傍での地震動の飽和を考慮するための係数である。

距離減衰式によって推定した応答スペクトルの例として、図 4 に 2024 年能登半島地震で震度 6 弱～6 強の揺れを記録した 3 地点の応答スペクトルの観測値と予測値を示す。図 4 の JMA 輪島を見ると、固有周期 1～2 秒付近にある 2 つのピークに対する予測値が過小評価になっているものの、全体的な振幅は対応している。K-NET 大谷と K-NET 七尾もピークは十分に再現できていないが、観測値と予測値の対応がよい周期も見られた。

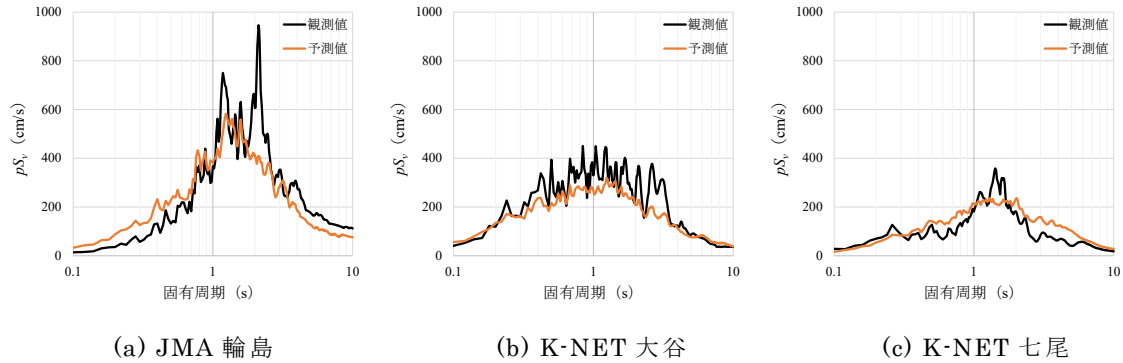


図 4 擬似速度応答スペクトルの観測値と予測値

続いて、2024 年能登半島地震を対象に、距離減衰式によって貯水タンク設置地点の応答スペクトルを推定するとともに、設計値や被害状況との対応を調べた。図 5 に既往報告 5) を参考にまとめた貯水タンク設置地点の分布と被害状況、図 6 に貯水タンク設置地点を対象に距離減衰式により求めた応答スペクトル予測値と設計値を示す。図 6(a) の加速度応答スペクトルの推定値は、バルジングの固有周期の範囲に対応する 0.1～0.5 秒に対して求め、図 6(b) の擬似速度応答スペクトルの推定値は貯水タンクの寸法から求めたスロッシング 1 次固有周期に対して求めた。また、図 6 の被害状況は(a)はバルジング、(b)はスロッシングに対応する。まず、図 6(a)を見ると、いずれの地点でも設計値を上回る推定値が見られる。A 配水池は貯水タンクが無被害でありながら、推定値が設計値を超えているが、それ以外の地点に

については、被害状況と推定値に整合性が見られる．一方、図 6(b)の擬似速度応答スペクトルは半分以上のデータで推定値が設計値を下回っている．また、貯水タンクに被害が生じた 3 地点のうち、L 配水池と M 病院は推定値が設計値よりも小さくなっており、図 6(a)と比較して、推定値と被害状況の対応がよくなかった．

最後に距離減衰式から求めた加速度応答スペクトルと擬似速度応答スペクトルに基づき、貯水タンクの側壁に生じるバルジングとスロッシングの動水圧を評価した．動水圧の評価において、サイト特性や貯水タンクのサイズに着目して、これらの違いによる動水圧の変化を考察した．サイト特性による動水圧の違いを考察するために、バルジングに影響を及ぼす短周期地震動と関連する  $V_{S30}$  として 150m/s と 300m/s、スロッシングに關係する  $\bar{V}_z(T)$  として図 7 に示す地盤モデル A、B の値を用いた．また、貯水タンクのサイズによる動水圧の違いを調べるために、表 1 に示す 3 つのタンクモデルを用いた．図 8 にサイト特性と断層最短距離による動水圧の違いをタンクモデルごとに示す．動水圧は参考文献 6 に基づき計算したものであり、バルジングとスロッシングの合成値である．まず、サイト特性の影響を見ると、 $V_{S30}$  による動水圧の違いは小さいが、地盤モデル A と B による動水圧の違いが明瞭であることから、深部地盤構造が動水圧に及ぼす影響が大きいことが分かる．タンクモデルによる動水圧の違いを調べると、タンクサイズが大きくなるほど動水圧が大きくなる傾向が見られた．

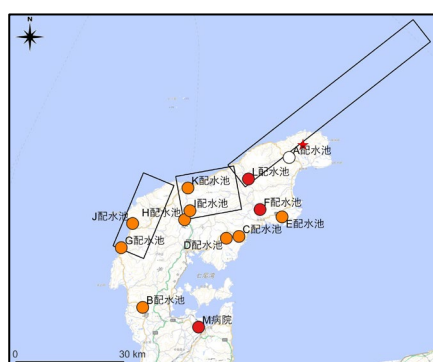
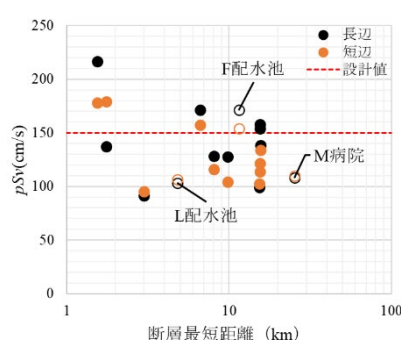
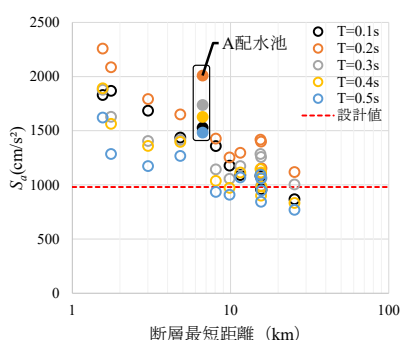


図 5 貯水タンク設置地点（○無、  
●バルジングのみ、●両方）



(a) 加速度応答スペクトル (b) 擬似速度応答スペクトル  
図 6 タンク設置地点の断層最短距離と応答スペクトルの推定値の  
関係（○：被害あり，●：被害なし）

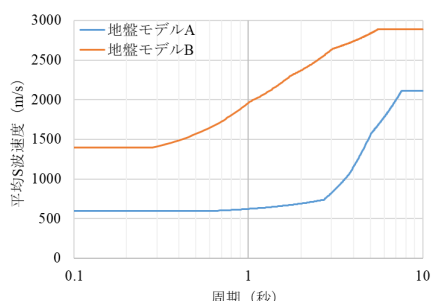


図 7 周期と深部地盤構造の  $\bar{V}_z(T)$  の関係

表1 タンクサイズとスロッシング1次固有周期

|      | 長さ (m) | 高さ (m) | 水深 (m) | 固有周期 (秒) |
|------|--------|--------|--------|----------|
| タンク小 | 6      | 3      | 2.7    | 2.9      |
| タンク中 | 10     | 4      | 3.6    | 4.0      |
| タンク大 | 20     | 5      | 4.5    | 6.5      |

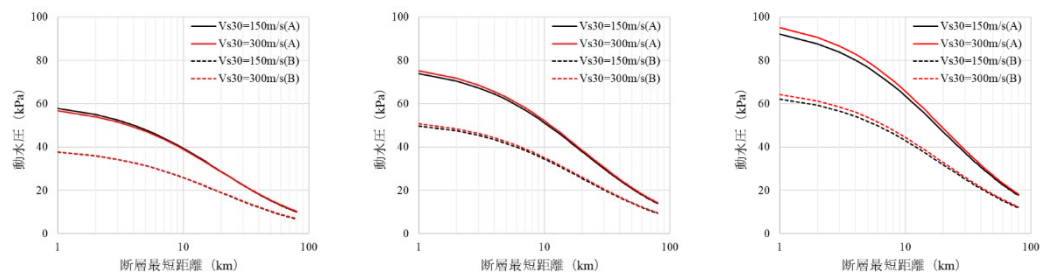


図 8 サイト特性と断層最短距離による動水圧の違い（左：タンク小，中央：タンク中，右：タンク大）

今後は 2016 年熊本地震，2011 年東北地方太平洋沖地震についても，貯水タンク設置地点の応答スペクトルを推定し，設計値や被害状況との対応を調べるとともに，貯水タンクの動水圧も評価する予定である。

## 謝辞

解析において，気象庁，国立研究開発法人 防災科学技術研究所の K-NET，KiK-net，福岡県，佐賀県，熊本県，熊本市，大分県，宮崎県，鹿児島県，石川県の地震観測記録を使用させて頂きました．一部の図の作成では，国土地理院の地理院タイル，QGIS 3.34.5 を利用させて頂きました．記して御礼申し上げます．

## 参考文献

1. 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），第 71 巻，第 4 号，pp.I\_764-I\_773，2015.
2. 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），第 71 巻，第 4 号，pp.I\_711-I\_720，2017.
3. 社団法人 強化プラスチック協会：FRP 水槽構造設計計算法（1996 年版），1996 年 12 月.
4. 国立研究開発法人 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション，<<https://www.j-shis.bosai.go.jp>>，（閲覧 2025.10.23）.
5. 公益財団法人 水道技術研究センター：能登半島地震によるステンレス製矩形タンク被害調査，矩形地上水槽（鋼製）の耐震設計に関する研究（Aqua-TANK プロジェクト），2024.
6. Housner,G.W.： The dynamic behavior of water tank, Bull. Seismol. Soc. Am.,Vol.53,pp.381-387, 1963.

## （ 発 表 論 文 ）

1. 西川隼人：距離減衰式による受水槽被害地点の地震動推定－令和 6 年能登半島地震を対象とした検討－，土木学会論文集，Vol. 82，No.13，2026（掲載決定）.
2. 西川隼人：令和 6 年能登半島地震を対象とした受水槽の動水圧の評価，令和 7 年度土木学会中部支部研究発表会，2026 年 3 月 6 日.
3. 西川隼人：受水槽被害評価のための地震動の距離減衰式－2011 年東北地方太平洋沖地震を対象として－，第 16 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム土木学会，2026 年 3 月 2 日.
4. 西川隼人：2016 年熊本地震における受水槽被害評価のための地震動の距離減衰式，日本地震工学会・大会－2025，2025 年 12 月 9 日.

5. 西川隼人：受水槽被害評価のための地震動の距離減衰式－令和 6 年能登半島地震を対象とした検討－，第 45 回地震工学研究発表会，2025 年 9 月 2 日．