# 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

井上 凉介1・坂井 藤一2・大峯 秀一3

<sup>1</sup>正会員 茨城大学准教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1) E-mail: ryosuke.inoue.6341@vc.ibaraki.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 (有)FS技術事務所(〒168-0072東京都杉並区高井戸東3-29-20)

E-mail: fuji-sakai2008@jcom.home.ne.jp

3正会員 (株) 日水コン事業統括本部 構造設計部 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)

E-mail: oomine\_s@nissuicon.co.jp

2016年熊本地震で被害が発生した給水タンク(地上水槽・高置水槽)・配水タンク等の水槽について、土木学会 地震工学委員会活動の一環として、熊本県内の病院・学校・水道局等に対して現地調査とアンケート調査を含む調 査を実施し、スロッシング(長周期応答)被害とバルジング(短周期応答)被害の観点から被害データを分析、被 害の様態を明らかにすると共に、アレー強震観測網記録を用いて、長周期・短周期応答スペクトルの広域分布図を 作成し、被害タンクの設置地点において、被害の様態と地震動特性の間に明確な相関があることを示した。

# Key Words: The 2016 Kumamoto Earthquake, water tank, elevated tank, distributing reservoir, sloshing,, bulging,, strong ground motion, short- and long-period response spectra

## 1. はじめに

2016 年4月14日および16日に発生した熊本地震(前震, 気象庁変位マグニチュードM<sub>6</sub>-6.5および本震, M<sub>6</sub>-7.3) によって,熊本県内において,市民の生活に直結する病 院・学校・集合住宅等の給水タンク(地上水槽・高置水 槽)および水道局施設の配水タンクに少なからぬ被害が 出ている<sup>11,2</sup>.

2011年3月の東日本大震災では、このような水槽に多 大な被害が発生した.著者らは、土木学会地震工学委員 会の活動の一環として、2013年6月~2015年3月給水タ ンク減災タスクフォースにおいて、給水タンクの被害を 調査し、被害と地震動との関係を分析したが、2015年4 月からは対象を配水タンクの被害にまで拡大したワーキ ンググループ活動(主査:坂井藤一、幹事:大峯秀一、 井上凉介)の中で、東日本大震災以外の水槽被害の調査 や被害メカニズムの解明に取り組んで来ている.今回の 熊本地震は、その最中に発生したので、本WGでは5月上 旬から学校・病院等の給水タンクおよび水道局等の配水 タンクについて、地震被害の情報収集を始め、被害が報告されている機関等についてはヒアリング調査により被害状況を把握すると共に、7月初めからは学校・病院・ 水道局等へのアンケート調査も開始、並行して7月上旬には県庁始め被災機関の現地調査も行った。

本論文では、8月末の時点までに得られた被害調査の 結果を分析すると共に、水槽の固有周期特性に対応して、 熊本県周辺を含めた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、各種タンク被害が現 出している地点との比較から、水槽の被害と地震動特性 との関係について検討した結果を報告する.

## 2. 水槽の設計基準

液体貯槽の耐震研究については、これまで数多くの研 究がなされているが、概要については、著者らの論文<sup>3</sup> を参照されたい.要約すれば、地震動に対するタンク躯 体設計に際し、短周期地震動に対するタンク容器のバル ジング振動応答と長周期地震動に対するタンク内液のス ロッシング振動応答を考慮する必要がある、ということ が基本である(例えば、坂井<sup>4</sup>).

病院・学校・集合住宅等の給水タンクの耐震基準は、 FRP製タンク・ステンレス製タンク・鋼製タンク等タン クの種類に応じて関連協会で作成されている<sup>5,6,7</sup>. これ らは過去何回か改定されているが、阪神淡路大震災直後 に改定されたものが現行基準となっている. たとえば、 1996年版のFRP水槽耐震設計基準<sup>5</sup>によれば、水槽の設計 地震力の標準値として、設計用水平震度K<sub>h</sub>を最大1(絶 対応答加速度SA=1g≒1000cm/s/s)とし、短周期動液圧を Housnerの剛体圧式により計算すること、スロッシング 波高・波動圧に対しては最大で疑似応答速度 PSV=150cm/sとして計算すること、その場合屋根などに 加わる衝撃圧は、箕輪の提案式<sup>60</sup>を参考に計算すること 等を規定している. なお、高置水槽に対しては、屋上に ある場合上記の値をそれぞれ1.5gおよび375cm/sとしている.

水道局等の配水タンクの耐震基準は、建築設備として の給水タンクの場合と異なり、日本水道協会による水道 施設耐震工法指針に依る. 1997年版の水道施設耐震工法 指針・解説<sup>90</sup>では、短周期応答に対しては、レベル2地震 動として兵庫県南部地震(M<sub>5</sub>=7.4)を想定し、応答値は 地盤種別、固有周期(厳密には容器の多くのパラメータ が関与したバルジング振動の固有周期)によって変化す るが、基準水平震度で約0.6~1.4程度(SA = 600~ 1400cm/s/s)と規定されており、これは2009年版<sup>100</sup>にも 引き継がれている.長周期応答(スロッシング)に対し ては、2010年版の指針<sup>110</sup>までは特に規定は無く、この新 指針においてPSV=100cm/sに対する波頭衝撃圧が算定で きるようになっているが、実際には設計者によって適当 なPSVの値が設定されているようである.

# 3. 給水タンク・配水タンク被害の調査

### (1) アンケート調査

給水タンクについては、地震時の避難場所となる小・ 中学校、および市民生活に極めて重要な大病院を主たる 対象として、また配水タンクについては、地震動で水槽 躯体に被害が出た水道局施設を中心に、熊本県・熊本市 等へのヒアリング結果などを参考にして、県内の各水道 関係機関を対象として、水槽被害に関するアンケート調 査を実施した(8月末現在では、調査はまだ継続中であ る).回答には、球形や円筒形のFRP一体形水槽、円筒 形のRC製やPC製水槽、矩形のRC製水槽の被害が数基含ま れていたが、他の大部分の被災タンクと形状・材料が異 なるので、本検討ではFRP製・ステンレス製の矩形水槽 の被害に限定して論じることにする.

アンケートにおける被害要因には、液状化や斜面崩壊

等の項目も含まれており,回答には斜面崩壊による被害 報告が数件あった.本論文では,水槽の振動応答による 被害に焦点を当てているので,検討の対象にしていない.

なお、後述の地震応答スペクトルの分布から判断して、 大分県由布市付近等でも水槽被害の現出が予想され、大 分県庁と由布市役所にも問合せる等調査をしているが、 現在までの時点では、水槽本体の被害報告はないようで ある.

#### (2) 熊本県での現地調査

事前のヒアリング調査において、スロッシングやバル ジングによって給水タンクや配水タンクに顕著な被害が 出ていることが把握されていた、図-1の□印に位置する 施設を、7月7日~8日にかけて現地視察した.



図-1 現地調査地点

この中で、大津菊陽水道企業団の楽善配水池について は、地震発生直前に納入されたこのステンレス水槽自体 の被害は軽微であったが、至近距離にある緊急遮断弁 制御装置についていた本震のディジタル加速度地震計記 録を同企業団から提供いただき、これは、今後の詳細な 構造解析により被災メカニズムを調べる上で非常に貴重 な資料である.

### (3) 調査の結果

このような調査から、2016年8月現在、15基の給水タ ンクと6基の配水タンクの被害情報を得たが、これら21 基の水槽に関する被害の結果をまとめると、表-1および 表-2のようになる.なお、表中の被害結果にあるタンク ユーザーの説明によれば、4月14日の前震だけで被災し た水槽は一基も無く、一基のFRP地上水槽のみにおいて、 4月14日の前震で側板が破損し、4月16日の本震で天板が 被災したということが報告されている.

表-1は、被災タンクの件数を施工年度別および材料別の件数に分けて示したものである。給水タンクを材料別に分けると、FRP製水槽の被災が7基(約47%)、ステンレス製水槽の被災が8基(約53%)になる。東北地方太平

#### 表-1 被災水槽の施工年度・材料別件数

設置年			1981年以前	1092~1006	1997年以降	不明	스러
			(1981年新耐震設計法)	1902 - 1990	(1995年阪神淡路大震災)	1.62	
材料別	FRP製	地上水槽	1	1	1	1	4
		高置水槽	2 (13.3%)	0	1	0	3
		小計	3 (20.0%)	1 (6.7%)	2 (13.3%)	1 (6.7%)	7 (46.7%)
	ステンレス製	地上水槽	0	1	4	0	5
		高置水槽	0	0	3	0	3
		小計	0 (0%)	1 (6.7%)	7 (46.7%)	0 (0%)	8 (53.3%)
	合計	地上水槽	1	2	5	1	9
		高置水槽	2	0	4	0	5
		小計	3 (20.0%)	2 (13.3%)	9 (60.0%)	1 (6.7%)	15 (100%)
給水タンク耐震基準の値 (用途係数I=1.0のとき)		絶対応答加速度	地表200	地表667	地表1,000	-	
		j SA (cm/s/s)	屋上300	屋上1,000	屋上1,500	-	
		疑似相対応答速度 相定な	古りさ	地表150	-		
		PSV (cm/s)	/(cm/s) 規定なし	現正なし	屋上375	-	

脚注:被災配水タンクは6基(全てステンレス製)で、内1基のみ1997.3の新基準9直前の設置、残り5基はそれ以降の設置。

衣=2   水槽の破損七一ト別件数(*付さ印は側板破場・大板破場寺と里移して破損しているケ	アースを示す)
---	---------

破損モード	側板	н'n	その他			
被災タンク		へ <sup>™</sup> 〔オ−バーフロー管破断〕	内部補強 •底板	中仕切り	架台との 接合部・基礎	
地上水槽	8	4(*3)	3(*3)	1(*1)	0	
高置水槽	2	[2]	1	0	2(*1)	
配水池	5	3(*3)	2(*1)	1(*1)	0	
合計	15	9(*6)	6(*4)	2(*2)	2(*1)	

洋沖地震本震(気象庁モーメントマグニチュード M<sub>\*</sub>=9.0)の調査結果<sup>3</sup>(それぞれ約90%と約10%)と比べ, 新しい(阪神淡路大震災以降の)ステンレス製タンクの 割合が大きい.この表の脚注にあるように,被災配水池 は全6基(呼称容量約200~1600m<sup>3</sup>)で,すべて,ステン レス製で,回答によれば本震により被災したもので, 1997年以降の設置である.東北地方太平洋沖地震本震の 結果<sup>3</sup>と比べると,給水タンクの被害127基に対して,配 水池の被害は11基(未発表資料による;内FRP製4基,ス テンレス製7基)で,給水タンクに対する配水タンクの 被害基数の割合は熊本地震の方がはるかに大きい.

表-2は、被害モード別の各水槽の件数を示している. 同表においては、側板、天板、その他が同時複合的に破 損している場合には基数を複数カウントしているので、 表-1と数字に差があることに注意されたい.同表の高置 水槽の内、天板の列の ① 内は、オーバーフロー管が側 板下部からタンク内に入り、上に90度曲げてあるタイプ のものが、貯液のスロッシングに伴いエルボの部分に応 力が集中し破断したものである.

天板が破壊するモードの主たる原因としては、過大な スロッシング応答(長周期的地震応答)により波高が増 大し、波動が側板の余裕高さを超えて天板に当たる衝撃 圧が考えられる.この場合、屋根近傍の側板上部にも衝 撃圧が作用するので、同時に側板上部が破壊することも ある.天板が破壊した水槽の被災例を図-2(a)~(c)に示 す. この図(c)のように大規模なステンレス配水池の天 板が大きく破損したケースはもう一例あるが,このよう な被災事例は過去に報告されていない.図-3(d)は,次 項に述べるバルジング振動も加わって側板も変形した例 と考えられる.表-2によれば,スロッシングによって天 板や内部配管のエルボ部が破損したのは21基(給水タン ク15基+配水池6基)中9基にのぼる.

側板が破壊する主たる要因は、地震時にタンク側板に 作用する動圧力である.これは、常時作用している静圧 力、および場合によって前述したスロッシング波動圧と 合成され、側板に過大な圧力を及ぼす原因となる.この 場合、タンクが剛体的な振動をするのか、タンク壁が性 体として変形しながら振動をするのかによって、作弾用 動圧力は違ってくるが、後者を考慮することが自然であ るので、ここではバルジング挙動として一括することに する.表-2でバルジング(短周期的地震応答)による破 損が主要因であると考えられるタンクは、側板の破壊し た15基に、少なく見ても、「その他」の破損モードの中 で明確に短周期的な応答が原因と考えられる最後の列の 1基を加えて、全水槽21基中16基はあると思われる.

側板が破壊した被災例を図-4(e),(f)に示す.この図 (f)の地上水槽の呼称容量は190m<sup>3</sup>で配水池に近い.この 水槽を含め,熊本県の特徴として井水槽が多く,水槽ま での途中の管路が破損し,中仕切りで仕切られた片側が 損壊しても,井水と残った片側で急場を凌いだという例



(a) 熊本市, 地上水槽, FRP 製, 1981 年設置



(b) 上益城郡, 地上水槽, FRP 製, 1999 年設置



(c) 熊本市, 配水池, ステンレス製, 2010年設置

図-2 天板の被害

は複数ある.

以上より、スロッシングによる被害がバルジングによ る被害に比べて9:16と、東北地方太平洋沖地震本震の (配水池被害も含めた)比率(約1:4)に比べて大きい のが今回の被害モードの特徴である.これを、ほぼ同じ 規模の地殻内地震である1995年兵庫県南部地震の給水タ ンクだけの被害基数とを比較してみると、後者の場 合は、兵庫・大阪・京都の3府県においてスロッシング 被害がバルジング被害のほぼ1/2程度の割合で出ている と報告されているが<sup>10</sup>、この報告は一社だけで当時は FRP製が多数を占めていたと考えられるが、割合だけで みると今回と近い.



(d) 合志市, 地上水槽, ステンレス製, 2012 年設置

図-3 側板上部と天板の変形



(e) 熊本市,高置水槽,ステンレス製,2004年設置



(f) 熊本市,地上水槽,ステンレス製,1995年設置図-4 側板隅角部の被害

# 4. 地震動特性と給水・配水タンク被害の関係

# (1)アレー強震観測記録と応答スペクトル

2016年4月14日の前震に関しては、九州各県のK-net, KiK-net, 震度5弱以上を記録した九州各自治体の震度計, 本州や四国の西端部も含む気象庁の震度計の各強震観測 網から得られた合計353地点の強震加速度記録,また4月 16日の本震に関しては,前震の各観測網による計549記 録に,NEXCO-Wの7記録,国総研の1記録,前述の楽善配 水池の1記録を併せた合計558地点の記録を用いて,水槽 の固有周期特性に対応して,熊本県内の各地点でどの位 の応答スペクトル値が得られるかを求め,水槽の被害と 地震応答スペクトル特性との関連を検討した.

これらの記録の精度や継続時間等は、各機関や各観測 点によって若干異なるものであるが、ここでは継続時間 のみについて、K-net波形に合わせて一律300sになるよ うに修正し、時刻歴上で波形の前後に2sずつのコサイン テーパを掛けた後で基線補正し、ローカットについては、 前震の記録は、①7~14秒の遷移域を有し14s以上の長周 期成分を打ち切るフィルター、長周期成分の卓越する本 震では、①に加えて②10~20sの遷移域を有し20s以上の 長周期成分を打ち切るフィルター、の2通りのバタワー ス・ハイパスフィルターに通した.ここで、継続時間が 300s未満の記録には、波形部前後にテーパを付けた後で、 後ろにゼロを追加し300sになるようにした(記録補正の 詳細については、筆者らの文献<sup>3</sup>を参照).

先に述べたように、現行の耐震基準では、短周期地震 動に対する側板への動液圧はSA(絶対応答加速度)に基 づき、長周期地震動による自由表面の液面上昇量はPSV (疑似相対応答速度)に基づき算定されるので、各地震 記録からNS(南北)・EW(東西)方向の水平2成分の応 答スペクトルSAおよびPSVを計算し、さらにNS・EW両ス ペクトルの幾何平均した応答スペクトルを考えることに した.ここでは、応答スペクトルは、上記①の遷移域で ローカットした記録についてはI.0-5sの間の不等間隔 の35周期<sup>3</sup>についてと、上記②の遷移域でローカットし た記録についてはII.0-7sのの間の不等間隔の51周期 (周期3-7秒間を0.2s刻みで細かく分割したもの),の2 通りについて計算している.

各タンクについての具体的な地震応答値を算定するに は、各タンクでのスロッシングとバルジングの固有周期 を知る必要がある.

#### a) スロッシングの固有周期について

表-1の15基の給水タンクと6基の配水タンクについて, 水平2方向のスロッシング1次モードの固有周期T<sub>s1</sub>を次の 式(1)<sup>例えば13)</sup>

$$T_{s_1} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \coth(\pi \frac{H}{L})}$$
(1)

から算出した.ここで、Hは地震時の水位、Lは矩形タン クの水平方向の水槽長さである.なお、応答スペクトル を算定するのに必要な減衰定数の値には、慣用的な値と して0.5%を採用した.地震時の水位に関して不明なもの もあったが、前震、本震とも発生時が夜間で水を使用しない時間帯であったため、その場合の水位は側板高さの 0.9倍(各社の水槽の満タンレベル)とした.

**表**-3はその結果を整理したものである.この表から給 水タンクのスロッシング1次固有周期は1.4-3.7s程度, 配水タンクのそれは2.1-5.4s程度である.したがって, 給水タンクや小規模配水タンクのT<sub>s1</sub>としては一般的に 1.6-3.5s程度(スロッシングで被害の出た水槽の最小の T<sub>s1</sub>は1.6s程度であったので,これを最小値とした),大 規模配水タンクのT<sub>s1</sub>としては,天板に大被害の出た2配 水池のT<sub>s1</sub>を含む3.2-5.6s程度と定めることにした.

表-3 給水・配水タンクのスロッシング1次固有周期

	地上水槽	高置水槽	配水池
基数	9	6	6
最大(s)	3.74	2.61	5.44
最小(s)	2.02	1.39	2.13
平均(s)	2.76	1.92	3.79

## b) バルジングの固有周期について

各タンクについてバルジング1次モードの固有周期T<sub>bl</sub> を知るには、それぞれについての詳しい解析をする必要 がある.ここでは、一般的な給水タンク全般についての おおよその固有周期を把握するために、前論文<sup>3</sup>と同様 に箕輪<sup>14)</sup>の研究結果を参考にして、T<sub>bl</sub>は0.15-0.4s程度 と想定した.大容量の配水タンクについては、実大振動 実験結果等も無いため、各メーカーの略算式による値を 参考に、0.2s程度と想定した.減衰定数については、給 水・配水タンク共に慣用的に用いられる5%を採用した.

#### c) 給水タンク・配水タンクにおける周期帯域挙動

以上より,水槽のスロッシングとバルジングの固有周 期帯域は明確にずれており,前者の「長周期帯域」挙動, と後者の「短周期帯域」挙動は分離して考えてよいと思 われる.

## (2) 応答スペクトルのコンター図

熊本地震において,水槽の地震応答が各地域において どの位のレベルであったかを知るため,各観測点の地震 記録から求めた応答スペクトルの広域コンター図を作成 した.具体的には,稠密な強震観測点における応答スペ クトル値からフリーソフトウエアGMT(Wessel and Smith, 1998)を用いて,図-5および図-6のようなコンタ 一図を描いた.その際には,「張力レベル」を0.25とし て空間的な補間を行ったが,前論文<sup>33</sup>と同様に地下構造 や地形などの情報は一切使用せず,単に"幾何学的な補 間"によって観測点間のスペクトル値を推定した(詳細



図-5 前震における応答スペクトルの分布と水槽被害地点

(a) 絶対加速度応答 SA のコンター図とバルジング被害地点(〇:地上水槽),

(b) 擬似速度応答 PSV (Ts<sub>1</sub>=1.6-3.5s の最大値をとった場合)のコンター図とスロッシング被害(報告なし)



図-6 本震における応答スペクトルと水槽被害地点(O:地上水槽, △:高置水槽, ◇:配水タンク) (a) 絶対加速度応答 SA のコンター図とバルジング被害地点,

(b) 擬似速度応答 PSV (Ts,=1.6-3.5s の最大値をとった場合)のコンター図とスロッシングの被害地点

は、渡邊氏による「GMTの使い方」マニュアル [2016年8 月31日閲覧]

www2.kobeac.jp/~kakehi/GMT/watanabe/watanabe\_gmt.pdf 等を参照).

#### (3) 地震動と水槽被害の関係

図-5(a), (b)は、前震におけるSA( $T_{bl}$ =0.3s)および PSV( $T_{sl}$ =1.6-3.5sの範囲での最大値)それぞれのコン ター図を描いたものである。前者の図中にはバルジング による被害地点(現時点で一ヶ所のみ)をプロットして ある。後者にはスロッシング被害が報告されていないの で、被害個所のプロットはない。

両図において、黄色い部分は1996年FRP給水タンク基 準<sup>5</sup>の標準値である1000(cm/s/s)、150(cm/s)のオーダー にそれぞれ対応している.両図において、これらの基準 値を超える応答スペクトル値を示す領域は狭く限られて おり、被災地点はSA値が基準値を超える領域に存在して いることが分る.PSVの値が基準値を超える領域はさら に限定的であり、前震ではスロッシングによる被害が報 告されていないことは、この結果からも理解できる.

図-6(a),(b)は、前震の場合と同様に、本震のSAおよ びPSVのコンター図を示すものであり、前者にはバルジ ングによる水槽被害の地点、後者にはスロッシングによ る水槽被害の地点をプロットしている.

(a)のSAコンター図においては、給水タンク基準値を 超える領域は、熊本県内ではかなり広く円形状に分布し、 バルジングによるタンク被害の地点はこの領域内か近傍 に存在する.図中で◇印は配水タンクの被害地点を表す が、被災配水タンクの設計例をSAに換算すると、レベル 2地震動に対して600~700 (cm/s/s)程度の例もあるのに対 し、コンター図上では2000 (cm/s/s)程度をとっている領 域がかなり広い範囲に認められ、短周期地震動に対する 設計外力に対して実際の地震外力が3倍程度になってい た可能性もある.また大分県の由布市付近にも給水タン ク・配水タンクの基準値を超える領域が存在する.前述 したように、現時点で水槽被害の報告はない状況である が、実際にはバルジング被害が出ている可能性がある.

(b)のPSVコンター図においては、給水タンク基準値 を超える領域は、布田川断層帯に沿って熊本県内に楕円 状に分布し、この領域において水槽のスロッシングによ る被害が生じていることが分る.特に、卓越している領 域ではPSVの値が200-300 (cm/s)程度出ている.

図-7は、スロッシング被害を生じた水槽近傍の5ヶ所 の観測点(図-6(b)の★印)におけるPSVの応答スペクト ル曲線を描いたものであるが、兵庫県南部地震の3地点 におけるPSVの応答スペクトル曲線<sup>15</sup>と比較されている. 図-7より、兵庫県南部地震における最大の応答スペクト ル値500-600(cm/s)ほどの値はでていないものの、今回 の本震のPSV値は200-500(cm/s)程度と,給水タンクや配 水タンクの基準値を大きく上回るPSV値がかなり広範に 出ていたことが分る.

本震で天板に図-2(c)のような大被害が出た2基の配水 タンク(以下,配水タンクA,配水タンクBと称する)の T<sub>s</sub>は3.3-5.4sであるが,各地震記録を用いて3.2-5.6sの 間のPSVを0.2s刻みで計算し,その最大値のコンター図 を描いたものが図-8である.







図-8 擬似速度応答 PSV(Ts<sub>1</sub>=3.2-5.6sの最大値をとった場合) コンター図とスロッシング被害地点(◇印)

これには、配水タンクAおよびBの被害地点がプロットされている.ここで、配水池B(2012年3月設置)については、設計時にPSV=150cm/sとして波頭衝撃圧を計算しているが、それに近いか、あるいはそれをやや上回る程度の地震応答が生じて、天板の被害に至った可能性が高い. 配水池A(2010年3月設置)については、設計時のPSVの値および波頭衝撃圧の考慮の有無が現時点で不明であるが、コンター図から見ると、設置個所はPSV=100cm/s程度の領域にあったと推定される.いずれにしても、両者について今後詳細な検討が必要である.

## 5. まとめと今後の課題

2016年熊本地震本震で少なからぬ被害が発生した熊本 県内の給水タンク(地上水槽・高置水槽)と配水タンク について,熊本県内の各機関に実地調査とアンケート調 査を行い,地震動による被災データをスロッシング(長 周期地震応答)とバルジング(短周期地震応答)の観点 から分析した.また,各強震観測網で得られた前震と本 震の多数の強震記録を用いて,対象領域の応答スペクト ルコンター図を描き,同県内の地震動特性と被害様態を 比較分析した.前震による被害がバルジングによる1件 しか報告されていなかったのと,前震での応答スペクト ルのコンター図で値の大きい範囲が小さかったことから, 本震に絞って結果をまとめると,以下のようになる.

- ① 被害調査結果では、被災水槽全21基中、給水タンクが15基(内FRP製7基、ステンレス製8基)、配水タンクが6基(すべてステンレス製)に被害が発生しており、過去の地震被害と比べると、水槽種別では配水タンクの割合が大きく、材質別にはステンレス製の割合が大きかった。
- ② 水槽の破損モード別には、スロッシング(長周期応答)による天板などの被害が9件、バルジング(短周期)による側板などの被害が16件報告されており、2011年東北日本太平洋沖地震本震(約1:4)に比べてスロッシングの割合が多く、1995年兵庫県南部地震における割合(約1:2)に近かった。
- ③ 給水タンクや小規模の配水タンクのスロッシングの 固有周期を1.6-3.5sと定め、その間のPSV(h=0.5%)の 最大値のコンター図を描くと、布田川断層帯に沿っ て楕円状に分布し、スロッシングによる被害地点を 1996年FRP給水タンク基準<sup>50</sup>の標準値150cm/s以上の範 囲と比較すると、両者はよく一致していた.この周 期帯域で、PSVのレベルが200-500cm/sに達する地域 もあり、これは同じ地殻内地震で規模もほぼ等しい 1995年兵庫県南部地震におけるPSVの大きい地点の 500-600cm/s程度よりやや小さいレベルであった.
- ④ 各水槽のバルジングの固有周期を0.15-0.4s程度と

定め、例えばT<sub>b1</sub>=0.3sのときのSA(h=5%)のコンター図 で給水タンク基準<sup>5</sup>の標準値1000cm/s/s付近の値を 取る領域とバルジングによる被害地点を比較すると、 両者はよく一致していた.SAのレベルが2000cm/s/s 程度に達する地域もあり、被災貯水タンクの設計例 からみると、SAを600~700cm/s/s程度に取っている 例もあり、それより3倍程度の加速度が作用したと 考えられる.

⑤ 天板に大被害が出た2つの大容量貯水タンクについて、固有周期3.2-5.6sにおけるPSV(h=0.5%)の最大値のコンター図と被害地点を重ね書きしたところ、両地点で少なくとも100~150cm/s程度のPSVは出ていたものと予想され、設定外力の取り方などを今後より検討すべきように思われる.

本WGでは、これらの結果を参考に、給水・配水タンク のスロッシングやバルジングの問題について、詳細な解 析や実験の実施も含めて、引き続き検討し、大地震時の これらのタンク施設の耐震安全性について提言を行いた いと考えている.

謝辞:本検討に当たり、熊本地震に関してはK,KiK-net (防災科学技術研究所),気象庁と自治体の震度計, NEXCO西日本(株),国総研,大津菊陽水道企業団・楽 善配水池の強震記録を使わせて頂いた. 兵庫県南部地震 に関しては、JR-W(鷹取駅),気象庁(神戸海洋気象 台), 文献16) (関西電力新神戸) の強震記録を使わせ ていただいた.本WG委員の平野廣和教授(中央大学)か らは、本震発生直後から7月7日~8日の現地調査までの 間,水槽被災に関する多くの貴重な情報を頂いた.給 水・配水タンクの現地調査やアンケート調査には、大津 菊陽水道企業団, 県庁, 市町村役場, 病院, 大学,等各 機関の担当者の方にご協力いただいた. 給水タンクや配 水タンクの耐震設計基準に関し、各メーカーのWG委員の 方にご教示いただいた. コンター図の作成に当たり, GMTを使用させて頂いた (Wessel and Smith, 1998). 記し て謝意を表する.

## 参考文献

- 国立研究開発法人 建築研究所:平成 28年(2016年) 熊本 地震による建築物等被害第五次調査報告(速報), 2016 年5月.
- 1) 熊本県環境保全課:厚生労働省所管水道施設災害報告, 2016年6月.
- 3) 井上凉介,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, Vol.71, No.4, L\_764-I\_773, 2015.

- 坂井藤一:液体貯槽の耐震設計研究に関する現状と課題, 土木学会論文集,第362号,I4,pp.1-11,1985.
- 5) 社団法人 強化プラスチックス協会: FRP 水槽構造設計 計算法(1996年版), 1996年12月.
- 一般社団法人 日本ステンレス工業界:ステンレス鋼板 製パネルタンク(溶接組立形)設計指針 建築設備編, 2013年2月.
- 鋼板製一体形タンク工業会:鋼板製一体形タンク設計指 針(KIT-D001-08),2008年11月.
- 8) 1997 箕輪親宏:長方形水槽のスロッシングインパクト (阪神大震災の水槽被害に関して),日本機械学会論文 集,C編, 63(612),pp.2643-2649,1997.
- 2) 社団法人 日本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説 (1997年版).
- 社団法人 日本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説
  (2009年版).
- 11) 日本水道鋼管協会:ステンレス鋼製角形配水池設計指針, 2010.

- 12) 積水アクアシステム株式会社:FRP水槽耐震設計基準改 訂と「セキスイ F パネタンク」の新耐震仕様(1997 年版),1997.
- 坂井藤一:土木技術者のための振動便覧,第11章 水に よる振動,11.1 静水に接する構造物の振動,pp.405-417, 1985.10.
- 14) 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,東京工業大学博士論文,2004.
- 15) Inoue,R., F. Sakai and S. Omine :WATER TANK DAMAGE DUE TO THE 2011 EAST JAPAN EARTHQUAKE IN CONSIDERATION OF STRONG GROUND MOTION AND DESIGN CODES, (submitted to 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE, Santiago Chile, January 9th to 13th 2017).
- 16) 日本地震工学会:兵庫県南部地震における強震動アレー 観測記録データベース(CD-ROM), 1998.3.

(?受付)

# DAMAGE OF WATER TANKS AND ITS RELATIONSHIP WITH STRONG GROUND MOTION IN KUMAMOTO AREA DURING THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

## Ryosuke INOUE, Fujikazu SAKAI and Shuichi OMINE

As one of the activities of the Earthquake Engineering Committee of JSCE, through a questionnaire survey the authors investigated the damage of water tanks, elevated tanks and distributing reservoirs in Kumamoto Prefecture during the 2016 Kumamoto Earthquake and clarified the characteristics of the damage from the viewpoints of sloshing and bulging. Then through the comparison between the damage characteristics and the contour maps of the response spectra, using many strong ground motion records, we found that there is a very good correspondence between them, and that the damage of sloshing and bulging was verified due to the appearance of long-period and short-period earthquake response exceeding the maximum design values in the present seismic design regulations.