

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

井上 涼介¹・坂井 藤一²・大峯 秀一³

¹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: inoue@mx.ibaraki.ac.jp

²フェロー会員 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

2011年東日本大震災で多大な被害が発生した受水槽・高置水槽について、土木学会地震工学委員会活動の一環として、宮城県他4県でアンケート調査を行い、スロッシング被害とバルジング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応答スペクトルの分布図を作成し、被害の様態との比較を通じて、広域の各地点において給水タンク被害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 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, water tank, elevated tank, sloshing, bulging, ground motion characteristics*

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災(気象庁 $M_w=9.0$)によって、東北地方の太平洋側各県において、市民の生活に直結する受水槽・高置水槽に多大な被害が出たことが報告されている(たとえば、文献1))。土木学会地震工学委員会・水循環ネットワーク災害軽減対策研究小委員会(宮島昌克委員長)では、これらの水槽の地震被害の軽減のための提言を行うことを目的として、2013年年6月に給水タンク減災タスクフォース(以下TF, 主査: 坂井藤一)を立ち上げ、これまで活動を行ってきた。ここではその活動の一環として行われた被災アンケート調査に基づき、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。なお、本報告の一部は、文献2)においても報告していることを付記する。

2. 水槽の耐震問題に関する既往研究と設計基準

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(たとえば、文献3)参照)。

まずこの種の初期の研究には、Westergaard⁴⁾のダム動水圧の研究や矩形タンクの地震時動水圧に適用可能なWerner & Sundquist⁵⁾の研究がある。

千田ら⁶⁾は、地震入力に伴う表面波動の問題(スロッシング)について、初めて速度ポテンシャル理論による厳密解(正弦波入力)を与えた。

Housner⁷⁾は、スロッシング問題に対し簡略なモデル化を提案するとともに、タンク壁への動水圧(剛体圧)とスロッシングの波高・動水圧(波動圧)の地震応答解析に関する実用的な方法を示した。

また、応答波高が高くなって、上部屋根へ衝撃圧力を及ぼす問題については、新潟地震の際の石油タンク被害を解析した山本⁸⁾が、初めて検討している。

これらは、タンクそのものは剛体と言う条件が前提である。坂井ら^{9), 10)}は、タンクを弾性体として扱う流力連成振動FEM解析の結果から、タンク側板の変形を伴う振動(バルジング)を解明し、タンクのバルジング振動による変形圧がHousnerの剛体圧を大きく上回る可能性があることを指摘した。現在石油タンク・LNGタンク等大型円筒形タンクの耐震設計では、この作用が考慮されるようになっている。

受水槽・高置水槽等矩形タンク（以下簡単に給水タンクと呼ぶ）に対しては、その後箕輪^{11), 12)}によって、スロッシング・バルジングの挙動解明についての一連の研究がなされている。

給水タンクの耐震基準としては、文献13), 14)および15)がある。これらは、ある年度で何回か改定されており、タンクの耐震設計も施工年によって異なる内容となっているが、1981年の新耐震設計法の導入や1995年の阪神・淡路大震災を受けての基準改定が大きな節目となっている。

1996年版のFRP水槽耐震設計基準¹³⁾によれば、受水槽の設計地震力の標準値として、設計用水平震度 K_h を最大1（絶対応答加速度 $SA=1g \approx 1000\text{cm/s}^2$ ）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 $PSV=150\text{cm/s}$ 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^{11), 12)}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1.5 gおよび375 cm/sとしている。

3. 給水タンク被災のアンケート調査

3.1 アンケート調査

本TFでは、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拠点病院を中心に、津波以外の原因で被害が出た水槽を主たる対象と定め、まず昨年9月以来宮城県の各機関にアンケート調査を実施した。

本年度（2014年度）になって、加速度応答スペクトルのレベルが大きい、宮城県以外の地域一岩手県、福島県、栃木県、茨城県中北部一の県庁や各市町村役所にもアンケートを送付して、小学校・中学校・高校などの水槽被災調査を行った。宮城県以外の4県において、対象を病院などに広げた調査はこれからとなるが、小・中・高に関しては現時点で回答はほぼ収束したものと考えられる。

回答にはごく軽微な被害の報告も含まれていたが、ここでは、顕著な被害が出ていると思われるものに限って検討している。アンケート項目には被害要因として液状化や斜面崩壊等の項目も加えたが、上記5県の回答にはこれに関連する被害報告はほとんど無く、今回のタンク被害の原因は、主として水槽の振動によるものと考えてよいように思われる。

このようにして、2014年8月現在において、5県から120基の被災水槽に関する情報を得ることができた。その結果をまとめると以下ようになる。

3.2 調査の結果

表-1は、被災タンクの地域別件数を示す。総数120基を受水槽と高置水槽に分けると、それぞれ76基（約63%）と44基（37%）になる。120基の中で、宮城県での被災数が71基（約59%）と圧倒的に多く、その中でも仙台市における被災数が54基（45%）と目立っている。これは、アンケート調査対象がこ

の地区できわめて多かったことに依るものであるが、この地区は人口が多く、施設の数が多いこと、後述のように、水槽の地震応答レベルが大きかったことも関係しているであろう。

表-2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。給水タンクを材質別に分けると、FRP製水槽の被災が107基（約89%）、ステンレス製水槽の被災が13基（約11%）になる。給水タンクの種類には、これらの他に、鋼板製一体形水槽があるが、今回の回答には事例が報告されていないので、本検討に含めていない。

施工年が不明の水槽の多くは1996年以前に設置されたものと思われる。これを含めて考えると、被災タンクの多くは（89%程度）、1996年以前の施工によるものと考えてよいであろう。中でもFRP製水槽の比率は約84%を占める。

表-3は、被害モード別の受水槽および高置水槽の各件数を示している。表-3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ので、表-1と数字に差があることに注意されたい。

表 - 1 被災タンクの地域別件数

	宮城県		岩手県	福島県	栃木県	茨城県	合計	水槽別割合(%)
	仙台市	その他						
受水槽	36	10	1	6	14	9	76	63.3
高置水槽	18	7	2	3	5	9	44	36.7
合計	54	17	3	9	19	18	120	100.0
地域別割合(%)	45.0	14.2	2.5	7.5	15.8	15.0	100.0	

表 - 2 被災タンクの施工年度・材料別件数

		施工年	1981年以前に施工 (1981年新耐震施行)	82～96年に施工	1997年以降に施工 (1995年阪神大震災)	不明	合計
材料別	FRP	基数	31	39	6	31	107
		受水槽	14	26	5	21	66
		高置水槽	17	13	1	10	41
	ステンレス	基数	0	3	7	3	13
		受水槽	0	2	7	1	10
		高置水槽	0	1	0	2	3
	合計	基数	31	42	13	34	120
		受水槽	14	28	12	22	76
		高置水槽	17	14	1	12	44
耐震基準の値		絶対応答加速度 SA(cm/s ²)	地表0.2g 屋上0.3g	地表(2/3)g 屋上1g	地表1g 屋上1.5g	—	—
		疑似相対応答速度 PSV(cm/s)	—	—	地表150 屋上375	—	—

表 - 3(a) 受水槽の破損モード別件数

破損モード	側板	天板(内、 宮城県内)	その他	合計
基数	69	20 (17)	11	100
割合(%)	69.0	20.0 (17.0)	11.0	100.0

表 - 3(b) 高置水槽の破損モード別件数

破損モード	側板	天板(内、 宮城県内)	その他	合計
基数	27	5 (5)	26	58
割合(%)	46.6	8.6 (8.6)	44.8	100

表-3における「その他」の内訳は、受水槽では、配管接続部からの漏水、アンカーボルトの変形や基礎破損など、底板からの漏水、内部補強破損等であり、高置水槽では、配管接続部破損、架台のずれ・アンカーボルトの破損・本体移動等、底板破損、ペントハウスの破壊等である。

天板が破壊するモードの原因としては、まず過大なスロッシング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。

スロッシング波高が側板の余裕高さの範囲に止まっている場合には、波動圧が側板にのみ作用する。普通この圧力はあまり大きな値にはならず、この圧力が単独で側板を破壊するケースは少ないものと思われるが、側板がきわめて弱い場合には、このようなことも考えられる。

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、タンク壁が弾性体として変形しながら振動をするのかによって、作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、ここでは一応バルジング挙動として一括することにする。

天板が破壊した水槽の被災例を図-1(a)および(b)に示す、図-1(b)のように、天板の破壊モードにはマンホール部が弱点となって破損する被害も含まれている。

側板が破壊した被災例を図-2(a)～(d)に示す。図-2(b)は、天板と側板に同時に被害が発生しているタンクの側板被害の例であるが、写真を見ると側板は上部ではなく、下部で破損しており、スロッシングが原因ではなく、側板はバルジングにより破損したものと思われる。

バルジングによる側板被害には、破損状態がこれらの写真のように顕著に見られない場合でも、パネル側板部からの漏水により、破棄されるに至った事例も多くある。

表-3によれば、スロッシングによって天板やマンホールに被害が生じたのは、受水槽被害20基中の17基、高置水槽被害5基のすべてが宮城県のタンクであり、今回の調査結果は、スロッシング被害が宮城県に集中し、他県では少なかったことを示している。



図-1 天板の被害
(a) 仙台市、受水槽、FRP製、1988年設置



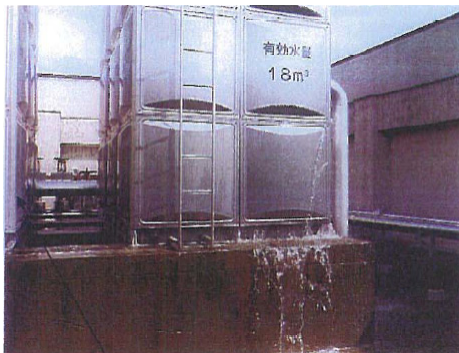
(b) 仙台市、高置水槽、FRP製、1987年設置



図-2 側板の被害
(a) 仙台市、受水槽、FRP製、設置年不明
(配管取付け部から破損が拡大している)



(b) 仙台市、受水槽、FRP製、1990年設置



(c) 仙台市、高置水槽、ステンレス製、設置年不明



図-2(d) つくば市、受水槽、ステンレス製、1985年設置

また表-3によれば、被害が判明したタンク全数の内、側板の被害は受水槽の69%、高置水槽の47%に発生しており、その割合がきわめて高いことが分かる。

先に述べたように、受水槽・高置水槽の被害モード「その他」の内訳をみても、架台の変形やずれ、アンカーボルトの破損、本体移動等、地震時動水圧が原因となる被害が相当数含まれており、バルジングによる被害が宮城県を含む広域においてきわめて多く発生していることが分かる。

配管接続部が破損したタンクの割合は被災タンク全体の13%である。ここで、配管被害の原因もまたバルジング応答（後述の短周期地震動応答）によるものが主と考えられるが、長周期的な地震動応答による構造物変位の増大ということも考えられなくはないので、今回は特に検討していない。

給水タンクにおける、スロッシングによる天板の被害とバルジング（短周期地震動応答）による側板等の被害について、今回の地震の場合と1995年兵庫県南部地震の場合（文献16））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ほぼ2:1程度の割合で出ているが、今回の場合にはバルジング被害がきわめて広範な地域に圧倒的に多く出しており、スロッシングの被害はほとんど宮城県に集中していることに、顕著な特徴が見られる。

4. 地震動特性と給水タンク被災の関係

4.1 使用した強震加速度波形とその応答スペクトル

2011年3月11日の本震に対して、多くの強震加速度記録が得られているが、本検討ではアンケート調査で対象にした5県とその周りの県を対象として、K-net, KiK-net, 気象官署と各自治体の震度計、仙台市付近のSmall-Titan（東北工業大学）の各強震観測網から得られた、合計745の記録を用いて、給水タンク被害と地震動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5sずつのコサインテーパを掛けた後で基線補正し、5~10sの遷移域を有し10s以上の長周期成分を打ち切るバターース・ハイパスフィルター（文献17）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、300sより長い波形は300sで打ち切って前後にテーパをつけた。

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を計算し、さらにNS・EW両スペクトルの幾何平均したものも含め3種類のSAとPSVの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0-5sの間の35周期について計算している（文献18））。

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が必要である。これについては、被災タンクでの固有周期を次のように考えることにした。

1) スロッシングの固有周期について

各タンクについて、もっとも影響の大きいスロッシング1次モードの固有周期 T_{s1} を剛体容器の速度ポテンシャル解から次式により求めた。

$$T_{s1} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \coth\left(\pi \frac{H}{L}\right)} \quad (1)$$

ここで、Hは地震時の水位（推定）、Lは矩形水槽の水平2方向のそれぞれの幅である。

なお、スペクトルを特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。

表-4は、アンケート回答の中でタンク諸元が明確であった仙台市の46基を取り上げ、その諸元を用いて、各タンクでの固有周期を式(1)から算出したものである。46基のタンクについての結果から、最大と最小の極端なケースを除いて、スロッシングの1次固有周期 T_{s1} は1.4-4.0s程度と推定した。その平均値は、受水槽で2.2s、高置水槽で2.0s、全体では2.16sである。

表-4 スロッシングの1次固有周期

	受水槽	高置水槽	全水槽
基数	34	12	46
最大(s)	4.13	4.47	4.47
最小(s)	1.60	1.13	1.13
平均(s)	2.21	2.03	2.16

2) バルジングの固有周期について

もっとも影響が大きいのは1次モードと思ってよいが、各タンクについてバルジング1次モードの固有周期 T_{b1} 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、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、箕輪ら¹²⁾の研究結果を参考にして、 T_{b1} は0.15-0.4s程度と推定した。減衰定数については、慣用的に用いられる5%を想定した。

3) 給水タンクにおける周期帯域挙動

以上より、給水タンクのスロッシングとバルジングの固有周期帯域は、1.4-4.0sおよび0.15-0.4sと明確にずれており、坂井ら^{9),10)}が円筒タンクにおいて明らかにしたように、両者の挙動は分離して考えてよいと思われる。本検討においては、前者を「長周期帯域」の挙動、後者を「短周期帯域」の挙動と呼んでいる。

4.2 応答スペクトルレベルから見たタンク被災

図-3の写真に示すのは、側板がバルジング振動を起こして被災したタンクの一例である。このタンクは保温タンクであり、そのため表装に隠れてタンク本体は見えないが、明らかにバルジング1次モードの変形が表装にまで顕著に表れており、それが原因となってタンク本体が破損したということは容易に推定される。

図-4は、このタンクに近い地点での強震観測記録のNS・EW水平2成分から求めた、絶対加速度応答スペクトルを示したものである。4.1で述べたように、タンクのバルジング1次の固有周期 T_{b1} は、0.15-0.4s程度と推定されるが、このきわめて短周期の帯域において、絶対加速度応答スペクトルのピーク値は1,500cm/s/sを超えるようなきわめて大きな値を取ることが分る。この値は、最新の耐震設計基準の最大値を超えており、このタンクでバルジング振動が顕著に発現し、タンク破壊につながったと結論してよいものと思われる。

このように、各被災タンクについての被害の様相とその地点近傍の地震記録特性とを関係付けることにより、それらのタンクがどのような原因によって、



図-3 バルジングによるタンクの被害例
(福島県相馬市、受水槽、ステンレス製、2002年設置)

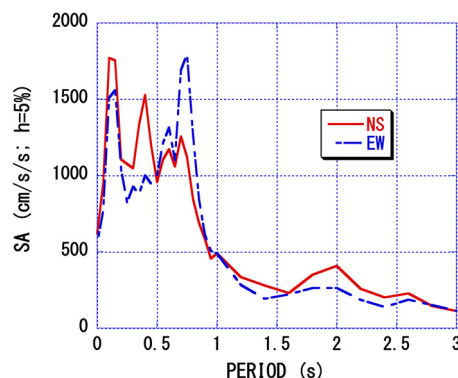


図-4 受水槽に近い地点の強震記録による
絶対加速度応答スペクトルSA

またどのようなメカニズムを通して、破壊・破損に至ったのかと言うことが明確になり、今後の耐震安全性向上への対策を考える上で大変有意義な結果が得られる。

先に述べたTF活動もこのような観点で現在活動を継続中である。ここでは、上記のような各タンクについての個別の議論は次の機会に譲り、タンク被害と地震特性との関係を大局的に把握するために行った検討について、以下に述べることにする。

4.2.1 応答スペクトルのコンター図

各地域において、給水タンクの地震応答がどの位のレベルであったかを知るために、各観測点の地震記録（ここでは水平2成分スペクトルの幾何平均したものを用いる）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をフリーウェアのGMT (Wessel&Smith, 1998)により「空間的に幾何学的に補間（張力レベルを0.25とした）」して、図-5(a)のようなコンター図を描いた。

この図は、岩手・宮城・福島・茨城・栃木の5県を領域として、★印で示される強震観測点で得られた地震記録から、各点での疑似速度応答スペクトルPSVを求め、上記5県内地域のレベルを示すコンターを作成、そのレベルに応じて色分けしたものである。

本図は、給水タンクのスロッシング応答を検討する目的のために、スロッシング1次固有周期 T_{s1} として2.0sを仮定した場合であり、減衰定数は前述したように0.5%としている。色分けはPSVのレベルを示し、たとえば $\log_{10}(\text{PSV})=2$ であるならば、PSVの値としては100cm/sになる。

4.2.2 5県におけるタンク被災と地震動の関係

(1) スロッシング被害について

図-5(a)は、スロッシング1次固有周期 $T_{s1}=2.0s$ とした場合のPSVコンター図である。2.0sとしたのは、スロッシング被害を受けた全水槽の平均的な固

有周期2.16s（表-4）に対応させたものである。図中にはスロッシング被害が発生した25基のタンクの位置を受水槽（○）と高置水槽（△）に分けてプロットしてある。これを見ると、仙台市の周辺でPSVの値が200(cm/s)程度（赤色レベル）の大きい値を示しているが、被災地点は必ずしもスペクトル値の大きい箇所と対応していない。これは各タンクの固有周期がかなり分散しており、必ずしも平均値のあたりにあるとは限らないためと思われる。

図-5(b)は、 T_{s1} が1.4-4.0sの間に分散しているものとみて、その間の各周期に対する速度応答スペクトルの最大値を用いてコンターを描いたものである。これを見ると、仙台市を中心とする宮城県、および他県においてもPSVが200(cm/s)程度に達する箇所が散見される。この図中にも被災タンク地点がプロットされているが、被災地点は150(cm/s)程度以上のスペクトル値を示す箇所ときわめて良く一致する。

現行の給水タンク耐震基準によれば、地表で重要度1.0の場合、PSV最大値は150(cm/s)であるから、これらの箇所でスロッシング被害が発生する可能性は非常に大きかったと言えるであろう。

この結果より、1.4-4.0sの間に固有周期が分散し、減衰定数が小さいために固有周期のずれに鋭敏なタンクのスロッシング特性、およびそれと各地域の地震動特性との相関が明確になったものと考えられる。

(2) バルジング被害について

図-6(a)および(b)は、 T_{b1} をそれぞれ0.2sおよび0.3sに設定した場合の絶対応答加速度SAのコンター図である。この T_{b1} の値は先に述べたように給水タンクのスロッシング1次固有周期の推定値を0.15-0.4sにしたことに対応させたものである。ここでは、水平2成分の幾何平均スペクトルを用いており、減衰定数も5%と大きく取っているため、コンター図が平滑化され、両コンター図はそれほど違わない。両図において、絶対加速度応答スペクトル値でSA=1000~2000(cm/s/s)程度あるいはそれ以上のレベルの地域が5県の広範な領域に見ることができる。

図中には、短周期地震動応答による被害（バルジング被害、すなわち側板被害、および「その他」被害の中で配管接続部・ペントハウス・底板の被害を除いたもの）が発生したタンクの地点をプロットしてある。受水槽に○印、高置水槽に△印が用いられている。

この図は、短周期地震動被害が発生したタンクの設置地点の分布は、5県の広い領域に渡り、SAのきわめて高いSA=1000~2000(cm/s/s)程度あるいはそれ以上のレベルの地域に該当していることが分かる。

現行の給水タンクの耐震基準によれば、地表で重要度1.0の場合、SAの最大値は1000(cm/s/s)であり、これらの箇所でバルジング被害が発生する可能性は非常に大きかったと言えるであろう。

この結果より、固有周期0.15-0.4s程度と推定される給水タンクのスロッシング特性と広い領域で強い加速度応答値を有する各地の地震動特性の関係が明

確になったと考えられる。

(3) 宮城県におけるバルジング被害と地震動特性

図-7(a)および(b)は、宮城県近傍のみを拡大表示したコンター図である。図(a)は、 T_{b1} を0.2sに設定した場合であり、図(b)は T_{b1} を0.5sに設定した場合である。両者のスペクトル値の分布を見ると、 $T_{b1}=0.2s$ の場合スペクトル値の大きい地点では、1000-2000(cm/s/s)程度あるいはそれ以上の値になっているが、 $T_{b1}=0.5s$ の場合では、最大で1000(cm/s/s)程度の大きさしか示していない。このことは、今回の地震では宮城県において0.2-0.3s程度の短周期領域の地震動は卓越しているが、0.5sになると顕著な卓越は見られなくなるということを意味している。

図-7には、宮城県における給水タンクのスロッシング被害発生と宮城県における地震動特性の関係がより明瞭になったものと考えられる。

これより、0.15-0.4sのスロッシング固有周期をもつ給水タンクのスロッシング被害発生と宮城県における地震動特性の関係がより明瞭になったものと考えられる。

5. まとめと今後の課題

2011年東日本大震災で多大な被害が発生した給水タンク（受水槽・高置水槽）について、宮城県を中心に周辺5県にアンケート調査を行い、被災データをスロッシング（長周期地震動）とバルジング（短周期地震動）の観点から分析した。また、各機関で得られたアレー強震観測網記録を用いて、対象領域の応答スペクトルコンター図を描き、広い地域の地震動特性と被害様態を比較分析した。結果をまとめると、以下ようになる。

- ① アンケート結果では、全被災件数120件の内、宮城県が約59%、特に仙台市が45%を占めており、この地域に被害が多かった。
- ② 被災タンクの多くは、1996年以前に施工された古いタンクが多く（約89%）、FRP製のタンクが約84%を占める。
- ③ スロッシングの影響と思われる天板の被害は、25件報告されており、宮城県で22件、他県では3件と宮城県に集中している。バルジングの影響と思われる側板被害は96件報告されており、その他被害の一部も含めると、今回の給水タンク被害の特徴は、広域で短周期地震動被害が数多く発生したことである。
- ④ 給水タンクスロッシングの固有周期を1.4-4.0s程度と定め、広域に渡る疑似速度応答スペクトルの分布とスロッシング被害が出た地点とを比較した所、宮城県を含む被害地点とスペクトル値の卓越する地点は略一致することが分った。ただし、スペクトル値が卓越する地点は、被害

地点以外にも見られ、これらの地点で実際に被害が発生していたか否かは今後の調査による。

- ⑤ 給水タンクのパルジング固有周期を0.15-0.4sと定め、絶対加速度応答スペクトルの分布を求めた所、スペクトル値の卓越する地域は広範に存在し、パルジング振動（短周期地震動応答）による被害が発生したタンクの地点とよく対応することが分った。
- ⑥ 今回の地震によって生じた長周期・短周期地震動応答のレベルは、広い領域に渡って、阪神・淡路大震災以降の最新耐震基準の最大値ベース、PSV=150cm/s、およびSA=1,000cm/s/sを上回るような、大きなものであった。

本TFでは、これらの結果を参考に、給水タンクのスロッシングやパ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、大地震時の給水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：本検討にはK, KiK-net（防災科学技術研究所）、気象庁と自治体の震度計、Small-Titan（東北工大）の強震記録を使わせて頂いた。本稿に係わるTF委員会活動を通じて、箕輪親宏博士（元・防災科学技術研究所）や平野廣和教授（中央大学）を始め、委員の方々から多くの有益な情報をいただいた。給水タンクのアンケート調査には、県庁、市町村役場、病院、大学等各機関の担当者にご協力いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 一般社団法人リビングアメニティ協会 給水タンク委員会：トピックスー東日本大震災における給水タンク調査，ALIA NEWS, 128号，pp.4-9, 2012.
- 2) 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宮城県内受水槽・高置水槽被害と地震動特性，土木学会第69回年次学術講演会概要集全国大会，I-159.
- 3) 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，I-4，pp.1-11, 1985.
- 4) Westergaard, H. M.: Water Pressures on Dams During Earthquakes, Transactions ASCE, Vol.98, pp.418-433, 1933.
- 5) Werner, P. W. and Sundquist, K. J.: On Hydrodynamic Earthquake Effects, Transactions American Geophysical Union, Vol.30, 1949.
- 6) Senda, K., Nakagawa, K.: On the Vibration of an Elevated Water-Tank - I, Technical Report Osaka University. Vol.4, No.117, pp.247-264, 1954.
- 7) Housner, G. W.: Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, BSSA, Vol. 47, no. 1, pp.15-35, 1957.
- 8) 山本義之：地震による石油タンクの液面の動揺と衝撃圧力，高圧力，第3巻，第一号，2-8，1965.
- 9) 坂井藤一，迫田治行：大型液体タンクの地震応答に関する研究，第4回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.624-629，1975.
- 10) 岡田統夫，坂井藤一，迫田治行，多田文三：有限要素法による大型液体タンクの地震応答解析），川崎重工技報，No.59, No.61号，1975年12月, 1976年6月.
- 11) 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），日本機械論文報告集，C編，63(612)，2643-2649, 1997.
- 12) 箕輪親宏：水槽の耐震性に関する研究，博士論文，2006.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 積水アークシステム株式会社：FRP 水槽耐震設計基準改訂と「セキスイ F パネルタンク」の新耐震仕様（1997年版），1997.
- 17) 斎藤 正徳：漸化式デジタル・フィルターの自動設計，物理探鉱，第31巻，第4号，pp.240-263，1978.
- 18) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，299p，1994.

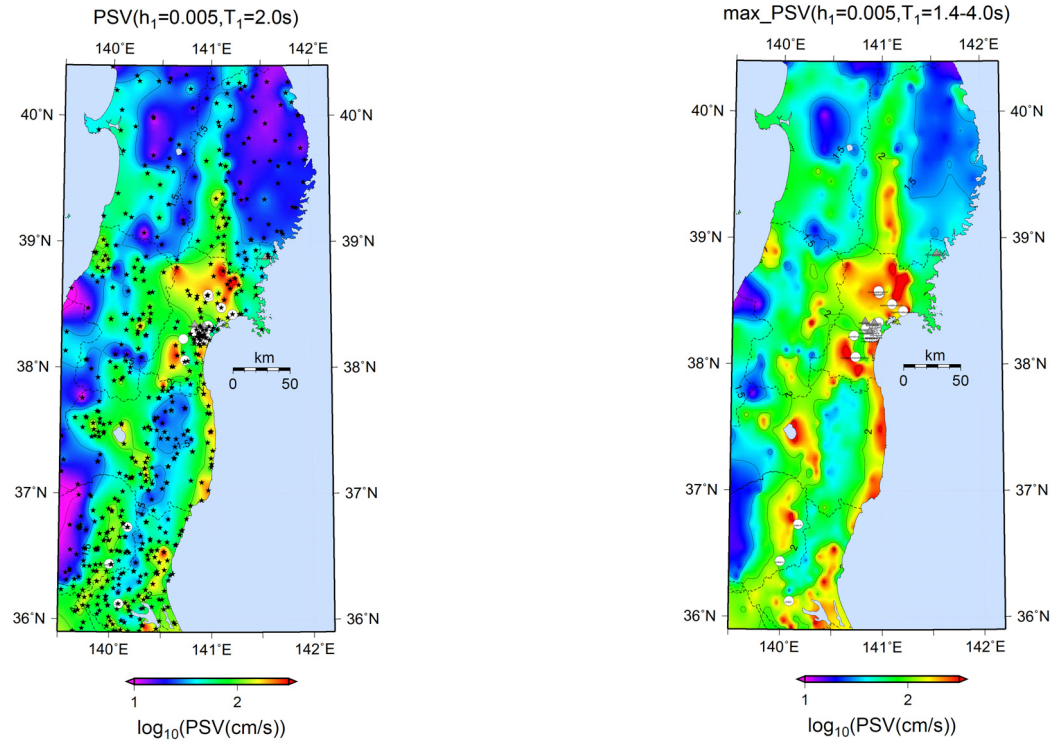


図-5 疑似速度応答PSVのコンター図とスロッシング被害地点（★：強震観測点，○：受水槽，△：高置水槽，(a) $T_{s1}=2.0s$ の場合，(b) $T_{s1}=1.4-4.0s$ のPSV最大値を取った場合）

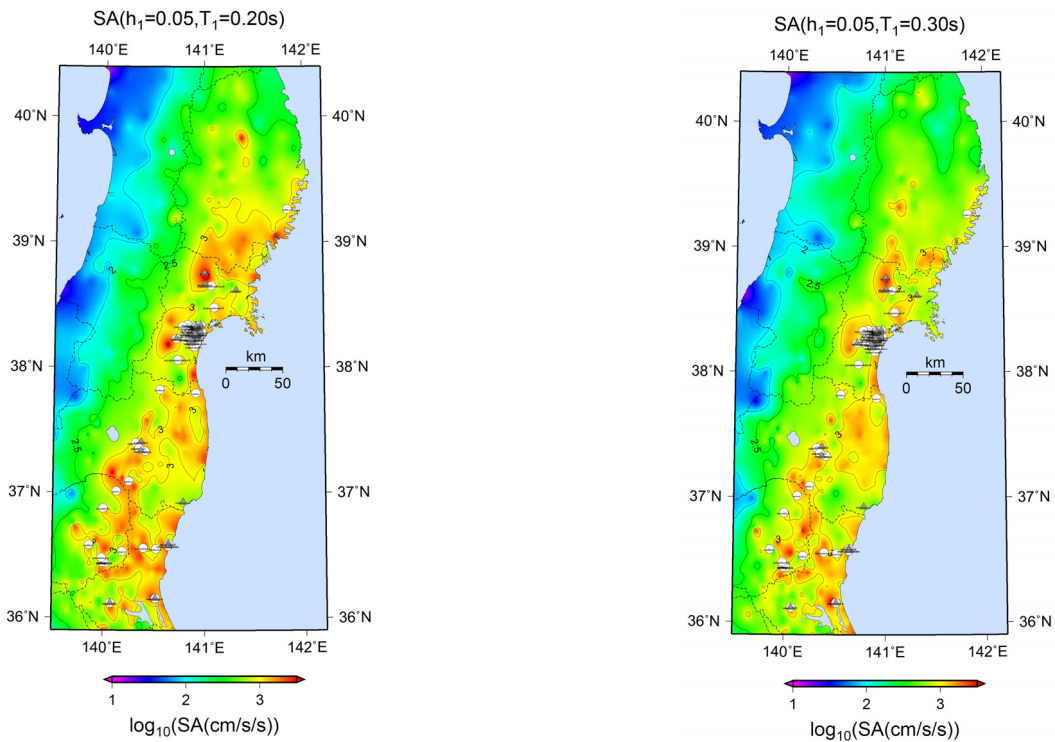


図-6 絶対加速度応答 SA のコンター図とバルジング被害地点（○：受水槽で側板，△：高置水槽，(a) $T_{b1}=0.2s$ の場合，(b) $T_{b1}=0.3s$ の場合）

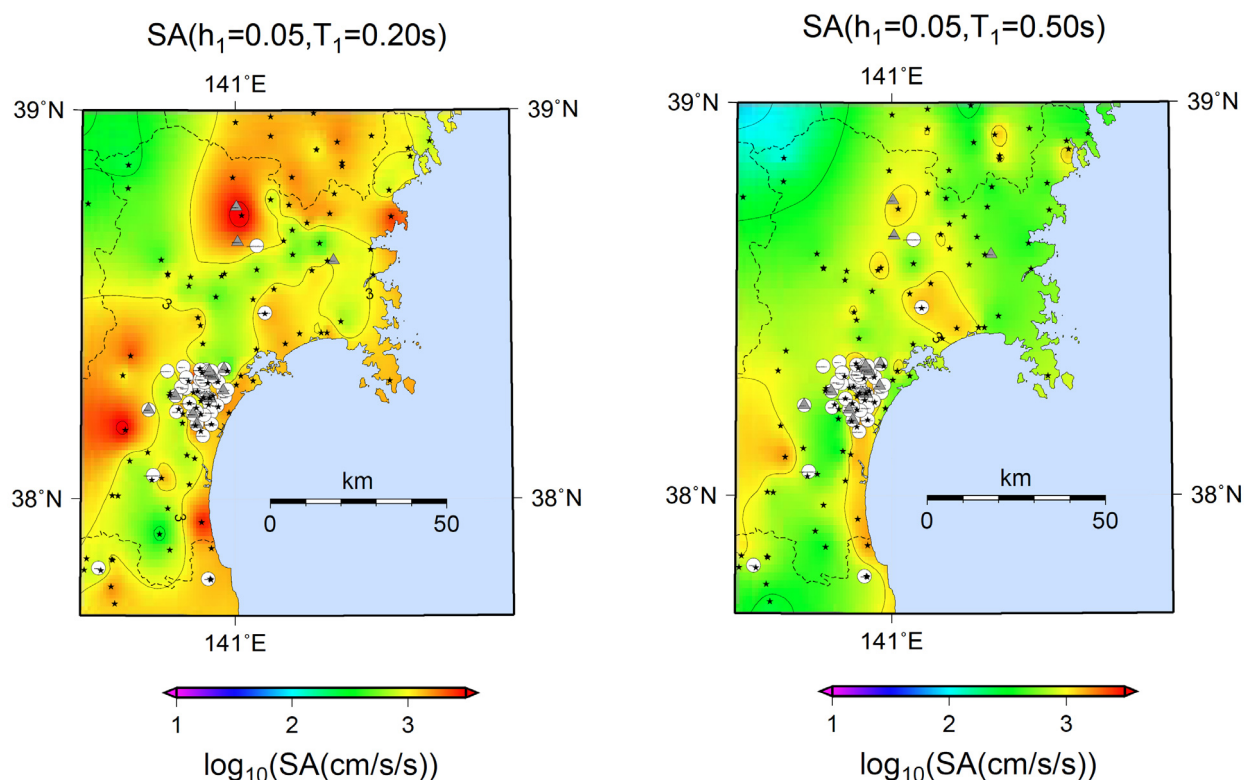


図-7 絶対加速度応答 SA のコンター図とバルジング被害地点（領域：宮城県のみ，★：強震観測点，○：受水槽で側板，△：高置水槽，(a) $T_{b1}=0.2s$ の場合，(b) $T_{b1}=0.5s$ の場合）

DAMAGE OF WATER TANKS AND ITS RELATIONSHIP WITH STRONG GROUND MOTION IN BROAD AREAS DURING THE 2011 GREAT EAST JAPANESE EARTHQUAKE

Ryosuke INOUE, Fujikazu SAKAI and Shuichi OOMINE

As one of the activities of the Earthquake Engineering Committee of JSCE, through a questionnaire survey the authors investigated the damage of water tanks and elevated tanks in broad areas during the 2011 Great East Japan Earthquake and clarified the characteristics of the damage from the viewpoints of sloshing and bulging. Then through the comparison between the damage characteristics with the contour maps of the response spectra, using many strong ground motion records, they found that there is very good correspondence between both, 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.